

Ida-Virumaa geoloogia

XVIII Geoloogia sügiskool



Eesti Looduseuurijate Selts
Tartu Ülikooli ökoloogia- ja maateaduste doktorikool
Tartu Ülikooli Geoloogia osakond
Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia instituut

Ida-Virumaa Geoloogia

Schola Geologica XVIII

Tartu 2022

Autoriõigused: autorid, toimetajad

Toimetajad: Oive Tinn, Kairi Põldsaar, Sigrid Soomer

Kaane foto: Peeter Paaver

Küljendus, kujundus: Sigrid Soomer

Soovitav viitamise vorm:

Kogu väljaandele:

Tinn, O., Põldsaar, K., Soomer, S., (toim.) 2022. Ida-Virumaa geoloogia, Schola Geologica XVIII. Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu, 59 lk.

Artiklile:

Puura.E 2022. Tahked jäätmed kui tuleviku ressurss Rmt.: Tinn, O., Põldsaar, K., Soomer, S., (toim.) Ida-Virumaa Geoloogia, Schola Geologica XVIII. Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu, lk 10-12.

Kaheksateistkümnenda geoloogia sügiskooli toimumist ning seotud teadusettekannete sarja „Schola Geologica” toetasid Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu Ülikooli ökoloogia- ja maateaduste doktorikool, Tartu Ülikooli geoloogia osakond, Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia instituut.



• GEOLOGIA SÜGSKOOL •

SISUKORD

AJAKAVA	6
AUTORID	8
EESSÕNA <i>Päärn Paiste</i>	9
TAHKED JÄÄTMED KUI TULEVIKU RESSURSS <i>Erik Puura</i>	10
MAAPINNA PÜSIVUS VANADEL KAEVANDUSALADEL <i>Madis Osjamets</i>	13
IDAVÖÖNDI GRAPTOLIITARGILLIIDI SETTIMISAEGSED REDOKSTINGIMUSED <i>Johannes Vind</i>	20
GEOLOOGINA ESTONIA KAEVANDUSES <i>Eelika Kiil</i>	25
KUKERSIINI LEVIKUST JA TEKKEST <i>Rein Einasto, Aat Sarv</i>	30
HOLOTSEENI MERETASEME MUUTUSED JA KIVIAJA KULTUURIPÄRAND NARVA-LUUGA KLINDILAHES <i>Alar Rosentau, Aivar Kriiska</i>	43
KAEVANDAMISE MÕJU FAUNALE <i>Marko Mägi</i>	47
JÄLGELEMENDID ULJASTE SULFIIDSE MINERALISATSIOONI ILMINGUTES <i>Rasmus Kont</i>	54

AJAKAVA

IDA-VIRUMAA GEOLOOGIA XVIII Geoloogia Sügiskool TalTech Virumaa kolledž, Kohtla-Järve

16. September

- 16:00 TERVITUSKOHV
- 16:45 Erik Puura – Tahked jäätmed kui tuleviku ressurss
- 17:15 Tarmo All – Eesti Energia ringmajanduse projektid põlevkivi kaevandamise ja kasutamise valdkonnas
- 17:45 Madis Osjamets – Maapinna püsivus vanadel kaevandusaladel
- 18:15 ÕHTUSÖÖK
- 20:30 - 22:00 Oive Tinn – Valge valgus. Valge pimedus. Gröönimaa. Geoloogiast ka...

17. September

- 08:30 HOMMIKUSÖÖK
- 9:30 Alar Saluste – Ida-Virumaa miljard võimalust tõusta ringmajanduse eestvedajaks
- 10:00 Marko Kohv – Virumaa sood ja kaevandamine
- 10:30 Johannes Vind – Graptoliitargilliidi idafaatsiese geokeemilised settimistingimused
- 11:00 Eelika Kiil – Geoloogina Estonia kaevanduses
- 11:30 KOHVIPAUS
- 12:30 Ekskursioon
- 18:30 - 22:30 ÕHTUSÖÖK - Vanameistri Pubis Jõhvis (koos saunaga)

18. September

08:30 HOMMIKUSÖÖK

9:30 Rein Einasto – Kukersiidi ja kukersiitpae levikust ja tekkeloost

10:00 Alar Rosentau – Holotseeni mertaseme muutused ja kiviaja kultuuripärand Narva-Luuga klindilahes

10:30 KOHVIPAUS

11:00 Marko Mägi – Kaevandamise mõju loomastikule

11:30 Rasmus Kont – Jälgelemendid Uljaste sulfidse mineralisatsiooni ilmingutes

12:00 LÕUNASÖÖK

13:00 Kojusõit

AUTORID

Rein Einasto - reinasto34@gmail.com
Tallinna Tehnikakõrgkooli emeriitprofessor, Paevana

Eelika Kiil - eelika.kiil@ut.ee
Tartu Ülikool, ökoloogia- ja maateaduste instituut, geoloogia doktorant

Rasmus Kont - rasmus.kont@egt.ee
Eesti Geoloogiateenistus, geoloog

Aivar Kriiska - aivar.kriiska@ut.ee
Tartu Ülikool, ajaloo ja arheoloogia instituut, arheoloog

Marko Mägi - marko.magi@ut.ee
Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduste instituut, linnuökoloog

Madis Osjamets - madis.osjamets@egt.ee
Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduste instituut, geoloogia osakond, doktorant
Eesti Geoloogiateenistus, vanemgeoloog

Päärn Paiste - paarn.paiste@ut.ee
Tartu Ülikool, ökoloogia ja maateaduste instituut, geoloogia osakond, teadur

Erik Puura - erik.puura@ut.ee
Tartu Ülikool, tehnoloogiainstituut, külalisteadur

Alar Rosentau - alar.rosentau@ut.ee
Tartu Ülikool, Ökoloogia- ja maateaduste instituut, rakendusgeoloogia professor

Aat Sarv - aat.sarv@envir.ee
Keskkonnaagentuur, eluslooduseosakond, spetsialist

Johannes Vind - johannes.vind@ut.ee
Tartu Ülikool, ökoloogia- ja maateaduste instituut, geoloogia teadur
Eesti Geoloogiateenistus, vanemgeoloog

EESSÕNA

Päärn Paiste

Kui rääkida Eesti maapõue õnnest ja õnnetusest, ei saa me kuidagi vaadata mööda Ida-Virumaast. Nii puurituse kui geoloogilise uurituse seisukohast ei leidu meie kaunil maal sellele vastast. Ka kliima- ja värkse energiakriisi võtmes on ikkagi kesksel kohal just Ida-Virumaa. Just nendesse keeristesse, ning taastutvuma Ida-Virumaa võlude ja valudega on suundunud ka XVIII Geoloogia Sügiskool. Geoloogia välipraktikumide käigus on kahtlemata iga tudeng nautinud meie maatükki idapoolses otsas leiduvaid tehismägesid ning kasutanud võimalust soojendada käsi auravate lõhede kohal, ahmides silmade ja sõõrmetega sisse meile pärandatud „maapõue õnnetust“. Olles samas veel teadmatuses kogu kaunist soisest maastikust, mida tuhamägede varjust – veidi eemalt – peab otsima. Ka selles peitub tolle kandi võlu, sest kus mujal saaks nii vahetult ja korraga kogeda looduse võlu kui ka inimtekkelist „valu“. Kuid valu on teadupärast mööduv nähtus ja see, mis veel kümme aastat tagasi tekitas vaid peavalu ja muresid, on tänasel päeval muutumas murede lahenduseks või potentsiaalseks tuluallikaks. Mida laiema vaate ja avatuma meelega me eilsetele muredele läheneme ja mida sügavamale me oma uuringutes kaevume, seda eredamalt hakkab meile ka terendama kirgas läik. Olgu see läige kas palavikuline, valge või metallikarva – leitud on ta siiski ja eks aeg annab vastuseid, milline neist kõige eredamalt särab.

Ja nagu 35 aastat tagasi Alo Mattiiseni viisijupi saatel, kõlgu ka täna (mõnevõrra täiendatud kujul) sõnad: „Ei taha, ei või, ei saa sind jätta, (Ida-)Virumaa!“

TAHKED JÄÄTMED KUI TULEVIKU RESSURSS

Erik Puura

Kui palju on Ida-Virumaa aheraine- ja poolkoksimägedes ning tuhaplatoodes põlevkivitööstuse tahkeid jäätmeid, ei oska hetkel keegi täpselt öelda. Ent juba 25 aastat tagasi arvutasin välja, et saaks rajada Hiina müüri analoogi (laius 6 m, kõrgus 10 m) kogu Eesti rannajoonele (3793 km), maismaapiirile (547 km) ja Peipsi kaldale. Iga Eesti elaniku kohta on loodusesse paisatud hinnanguliselt 600-700 tonni jäätmeid. Sellist kogust ühe inimese kohta on endale lihtsam ette kujutada, nii saaks igaüks sellise kogusega katta Tallinna raekoja platsi 10 cm paksuse kihiga või siis poolenisti täita Tartu Aura keskuse suure basseini.

Tahkete jäätmete kasutamine on Ida-Virumaal senini olnud väga väikesemahuline ja episoodiline. Enim on tähelepanu saanud aheraine kasutamine täitematerjalina ning jäätmemägede endi kasutamine ehitusalusena (Eesti Energia tuulepark) ja spordirajatistena (Kiviõli seikluspark, krossirajad). Huvi juba ladestatud materjali tööstuslike kasutusvõimaluste leidmiseks aga on järjest kasvav, näiteks kaltsiumkarbonaadi tootmise arendamine Ragn Sells OSA Service'i projekti puhul põlevkivituhast ning Corestone projekti puhul aherainest. Huvi kasvu peamiseid põhjusi on kolm: 1) tahked jäätmed paiknevad maapinnal, on kergesti kättesaadavad ning nende kasutuse mõju keskkonnale on pigem positiivne, sest kõrvaldab reostusallika; 2) põlevkivituha puhul on tegemist materjaliga, mis seob CO₂ või siis asendab tooret, mille töötlemisel tekiks CO₂; 3) kui varem orienteeriti põhitähelepanu värsketele jäätmevoogudele, mis ei olnud atmosfääritingimustes muutunud, siis praeguseks on tekkinud määramatus, kui kaua veel selliseid vooge üldse tekib.

Maavarade kompleksse kasutamise olulisusest on räägitud aastakümneid. Nii näitas Tallinna Tehnikaülikooli professor Verner Kikas 1988. aastal, et kui põlevkivi tolm põletamise kõik tuhafraktsioonid oleksid vastavalt ettepanekutele kasutusele võetud, ületaks tuha väärtus põlevkivi enda väärtuse. Ülipeen elektrifiltrite tuhk sobis hästi tsemendiklinkrisse kipsi asemel, saadud tuhkportlandtsement oli niivõrd heade omadustega, et seda kasutades on ehitatud Tallinna teletorn. Tsüklonite tuhast (seade peenosakestest puhastamiseks, toim.) toodeti kuulsaid Narva plokk, mille

kohta levis pahatahtlik jutt nende radioaktiivsusest. Ei kukersiitpõlevkivis ega selle tuhas ei ole kõrgendatud kontsentratsioonides radioaktiivseid elemente. Katelde tuhk aga oli sobilik happeliste muldade lupjamiseks. Ometi selliseid plaanid täies mahus ei realiseeru, ning peamiseks põhjuseks on see, et jäätmete tekitaja ei saa anda garantiisid jäätmevoogude kestlikkuse kohta. Kokkuvõttes ongi lihtsam ja kindlam jäätmed keskkonda paisata, kus atmosfääritingimustes tuha sideainelised ning väetisteks sobivad omadused vähenevad ja kaovad.

Tuhkade paigutamisel vee ja atmosfäärigaaside meelevalda toimunud muutuste tõttu on sellise jäätmete kasutamine materjalide omaduste ja heterogeensuse tõttu märkimisväärselt vähem atraktiivne, kuid see-eest on selgelt teada, kui palju mingit materjali on olemas, et selle ümbertöötlemiseks tööstuslik kontseptsioon ja äriplaan püsti panna.

Põlevkivi aheraine kasutamisel killustiku ja täitematerjalina on välja toodud probleemset kaugust arendatavatest objektidest. Kindlasti on materjali transpordil kümnete kilomeetrite kaugusele hind ja ökoloogiline jalajälg, kuid kui materjal on sobiliku kvaliteediga, on keeruline uskuda, et väikses Eestis on uue kaevanduse rajamise jalajälg objekti vahetusse lähedusse väiksem kui transpordi jalajälg.

Mõte, mida alates kevadest oleme Tartu Ülikooli, Tallinna Tehnikaülikooli ja Eesti Geoloogiateenistusega arendanud, on seotud tervikliku lähenemisega Ida-Virumaa tahketele jäätmetele kui ressursile. Jäätmete kaardistamisel ja keskkonnamõtjude hindamisel on läbi viidud väga palju üksikprojekte ja uuringuid, juba esialgses nimistus on üle 100 aruande, kuid puuduvad suuremad ja kokkuvõtavad uuringud, ning eriti puudulik on andmestik, missugune on jäätmete koostis ja heterogeensus. Eristada võib väga erinevaid jäätmetüüpe: aheraine (sh erineva rikastustehnoloogia kasutusel tekkinud erinevad alatüübid), põlenud aheraine, soojuselektriamaade tuhk (sh erinevate põletustehnoloogiatega tuhad), poolkoks jne. Samuti on materjal atmosfääritingimustes seismisel muutunud iga objekti puhul erinevalt. Kõikide nende materjalide koostise ja heterogeensuse teaduslikud uuringud on aluseks ettevõtete poolse huvi kasvule ning ettevõtete poolt väga oodatud. Lisaks on paljud jäätmetüübid oluliseks keskkonnareostuse allikaks ning jäätmete kasutuselevõtt võimaldab keskkonnareostuse põhjused likvideerida.

Terviklik lähenemine hindab iga objekti materjali kasutusvõimalusi erinevateks tööstuslikeks rakendusteks (keemiatööstus, väetisetööstus, ehitusmaterjalide tööstus, täitematerjal) ning objekti ennast ehitusaluse

või kultuuri- ja spordirajatisena, arvestades ka keskkonnareostuse vähendamise võimalusi kui kasutuse positiivset mõju.

Uuringute tulemusena, mille käigus selgub jäätmete kasutuse perspektiivikus ning parimad võimalused, kasvab hüppeliselt ettevõtete huvi tahkeid jäätmeid kasutada ning suureneb ettevõtete koostöö Eesti ülikoolidega. Eeluuringutest saadava info baasil tekib ettevõtetel huvi käivitada suuremahulisi rakendusuuringuid ning arendada uusi ärimudeleid.

MAAPINNA PÜSIVUS VANADEL KAEVANDUSALADEL

Madis Osjamets

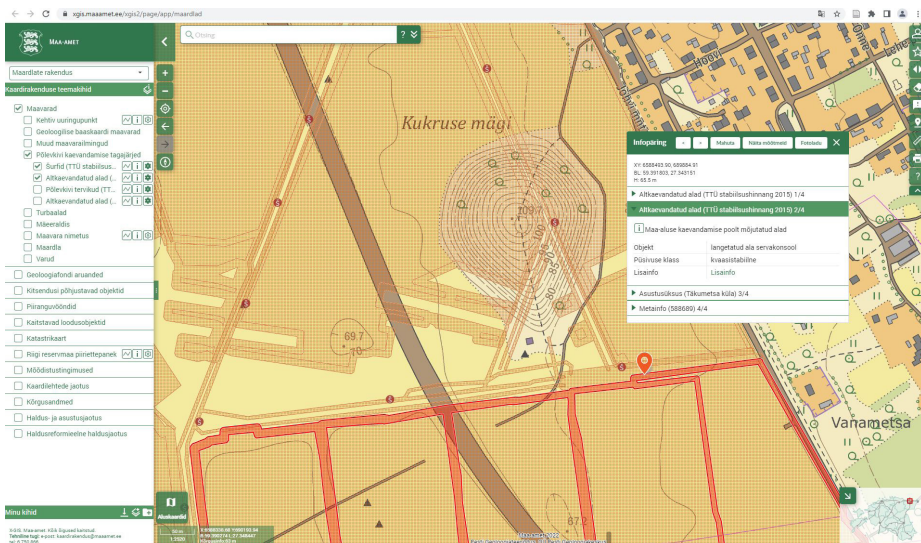
Sarnaselt seekordsele sügiskoolile on Ida-Virumaale keskendunud ka Eestis aset leidnud allmaakaevandamine. Möödunud sajakonna aasta vältel on põlevkivi kaevandamine jätnud Ida-Virumaale üle 300 km² altkaevandatud ala ja üle 500 miljoni m³ mahus suletud kaevanduskäike (Valgma 1999). Kõige esimesed allmaakaevandused rajati Kohtla-Järve ja Jõhvi vahelisele alale, kus põlevkivi kihind asub maapinnale lähedal. Madalad kaevandustühimikud võivad aga põhjustada stabiilsusprobleeme maapinnal, mille ilmumine sõltub peamiselt kaevanduse peal oleva katendi paksusest ja koostisest, kasutatud kaevandustehnoloogiast ning väljatud kihi paksusest (Toomik 1999).

STABIILSUSRISKIGA ALAD JA VARINGUD

Eestis esinevad allmaakaevanduste poolt tekitatud ohud maapinnale ei ole reeglina väga suured. Kõige levinumad maapinnal nähtavad mõjud on madalate käikude ja šurfide varingud. Väheasustatud aladel on peamiseks selliste varingutega kaasnevaks ohuks kaevanduskäiku juurdepääsu võimaldavate avade tekkimine. Juurdepääs varisemisohtlikele kaevanduskäikudele on võimalik ka sulgemata stollide ehk mäeküljel või astangul avanevate kaevanduste sissepääsude kaudu. Põllumajandusmaale tekkinud varinguaukudes on viga saanud kariloomad ja põllumajandustehnika. Ohtlikumad on maapinna varisemised tihedalt asustatud aladel ja hoonete lähedal. Eestis on kaevandamisel reeglina arvestatud olemasolevate hoonete ja teede paiknemisega ning nende alla jäeti toetustervikud. Siiski on Ida-Virumaal tuhatkond elu- või ühiskondlikku hoonet, mis paiknevad kvaasistabiilsel alal ehk alal, kus võib ettenägematul ajal esineda probleeme maapinna stabiilsusega. Maapinnale jõudvad varingud ei ole kaevandusalal ainukeseks ohuallikaks. Kohtla-Järvel läbi viidud vajumisvaatlused näitavad, et maapinna järelvajumine on väiksem langetatud aladel ja suurem neid ümbritsevate kaevanduskäikude ehk strekkide alal. Strekkide kohal on 20 aastaga

mõõdetud järelvajumiseks 13 mm ja langetatud alal 5 mm (EGF 2029; Talviste 2018). Enamasti jäävad nii väikesed vajumised märkamatuks. Ühe hoone piires toimuvad erinevad vajumised võivad pika aja jooksul siiski tekitada probleeme, mis esmalt avalduvad pragudena seintes.

Ida-Virumaal on kaevandamine küllalt hästi dokumenteeritud. Kaevandusplaanidel on jäädvustatud kaevanduskäikude asukohad, kaevandamise aeg ja sügavus; samuti saab infot kaevandamisviisi kohta. Kaevandusplaanidel oleva info alusel saab empiirilistel valemitel põhineva algoritmiga määrata ohualasid ehk kvaasistabiilset ala, kus maapinna vajumised ja varingud võivad tulevikus aset leida (Karu 2012). Eestis on põlevkivikaevanduste kaevandusplaanide digitaliseerimise ja stabiilsushinnangu töö teinud Tallinna Tehnikaülikool (Väizene jt 2015). Stabiilsushinnangu tulemused on avaldatud Maa-ameti maardlate kaardirakenduses, mille kaudu on igapäev võimalus vaadata, kas huvipakkuvas kohas paiknevad kaevanduskäigud, ning kas maa on



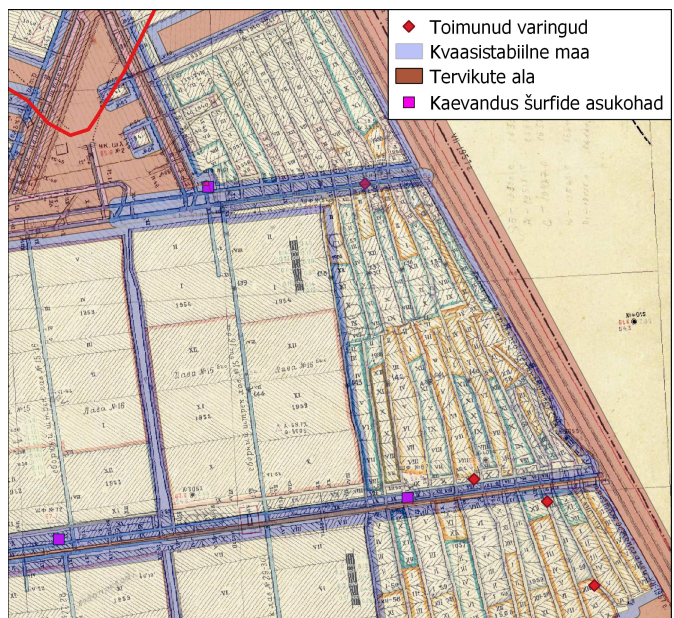
hinnatud püsivaks või kvaasistabiilseks (joonis 1).

Joonis 1. Maa-ameti maardlate rakenduses avaldatud kaevandusalade stabiilsushinnangu väljavõte

Alati ei avaldu kaevanduse lae varingu mõju maapinnal. Ühendkuningriigi kaevandusaladele ehitamise juhistes on toodud hinnang, et kaevanduskäigu sisse langemine võib avalduda maapinnal, kui

käigu paiknemissügavus on väiksem kui 5 kuni 10 kordne väljakaevatud kihi paksus (Parry ja Chiverrell 2019). Selle rusikareegli põhjal ilmneks Kohtla-Järve ümbrusele iseloomuliku 2,5 m paksuse väljakaevatud kihi mõju maapinnal juhul, kui kaevandus asuks madalamal kui 12,5 m kuni 25 m. Eesti olusid paremini arvestava empiirilise valemiga on leitud, et vanadele kaevandustele iseloomulike 4-5 m laiuste ja 2,5 m kõrguste kaevanduskäikude varing avalduks maapinnal 9 meetrist õhema katendi puhul (Toomik 1999). Kaasaegsemate meetoditega on Kohtla-Järvel tugevusmudeliga analüüsitud kaevanduslae deformatsioone 12,5 m paksuse katendi korral. Analüüsil leiti, et lagi hakkab purunema alles 15 m laiuse ava korral, kuid varing ei ulatu veel maapinnani (Talviste 2018).

Vanemate kaevanduste alal on kaevandamine lõppenud juba üle 50 aasta tagasi. Selle aja jooksul on toimunud mitmeid kaevanduste poolt põhjustatud varinguid, millest 96 on dokumenteeritud (Vassiljev jt 2018). Pooled dokumenteeritud varingutest on põhjustanud kaevanduse katendit läbinud vertikaalsete šurfide sisse varisemine. Kolmandik varingupunkte asub kaevanduskäikude ja langetatud ala servas ning 17% kaevanduskäikude mõjualas. Ligi kolmandik varinguid on toimunud väljaspool kvaasistabiilseks hinnatud ala, mis näitab, et varingurisk on ilmselt ulatuslikum (joonis 2).



Joonis 2. Varingud on toimunud ka väljaspool kvaasistabiilseks hinnatud ala

Kaevandusaladel stabiilsuse tagamine ei ole üksnes Eestis küsimuseks. Kaevanduste pealse maapinna stabiliseerimiseks on enamasti kasutatud tühimike täitmist väheväärtusliku materjaliga ehk tagasitäitmist. Kõige lihtsam on tagasitäitmist teha töötavas kaevanduses, sest siis on käikude lagi stabiilne ja vajadusel olemas käikudesse juurdepääs. Ka Eestis kasutati vanades kaevandustes osalist tagasitäitmist, kus põlevkivist välja sorteeritud aherainet ei toodud maapinnale, vaid see laoti väljakaevatud kaavelangi alale toetusriitadeks.

Keerulisem on maapinna stabiliseerimine juba suletud või mahajäetud kaevandustes, kus kaevanduskäikudesse enam turvalist juurdepääsu pole. Mahajäetud madalatel kaevandusaladel on maapinna stabiliseerimiseks võimalik kaevanduskäikude pealse katendi lahtikaevamine ja tihendatult tagasitäitmine. Uute objektide ehitusel saab lisaks kasutada kaevandusest sügavamale süvistatud vaiadele ehitamist nagu seda on tehtud näiteks Kohtla-Järvel Vironia ostukeskuses (Ehitisregister). Olemasolevate hoonete alust maapinda lahti kaevata ei saa; sellistel aladel on kaevandustühimikesse pumbatud tagasitäidet maapinnalt puuritud puuraukude kaudu. Ulatuslike tagasitäitmise objektidel, kus käigud asuvad väga maapinna lähedal, on peetud kõige odavamaks meetodiks katendi lahtikaevamist. Šotimaal, Glasgow lähedal täideti lahtikaevamise ja tihendatult täitmise teel 12 ha suurune kaevandusala. Arvestati, et võrreldes puuraukude kaudu seguga tagasitäitmisega, säästeti objektil 4 miljonit naelsterlingit (Brook 1994). Eestis on sarnast meetodit kasutatud 2004. aastal Sillamäel, kus terminali rajamisel stabiliseeriti lahtikaevamise ja tihendatult täitmise teel 3 ha suurune uraanikaevandusala. Varinguala lahtikaevamist ja tagasitäitmist on Eestis edukalt kasutatud ka šurfide varingute korral. Eelkõige sobib see meetod kohtadesse, kus pole välja ehitatud hooneid ega asu tihedalt maa-aluseid võrke. Eestis võib selliselt tagasitäitmine sobida põllumaadena kasutusel olevate Kukruse ja Ubja kaevanduse aladele.

Puuraukude kaudu kaevandustühimike seguga täitmine jaguneb pumbatava segu omaduste alusel kaheks: 1) hüdrauiliseks tagasitäiteks ja 2) tsementeeruvaks paksema konsistentsiga (*paste backfilling*) tagasitäiteks (Sheshpari 2015). Nendest meetoditest vanem on hüdrauiline tagasitäitmine, kus üksikute puuraukude kaudu pumbatakse

kaevandustühimikesse vedelat mitte-tsementeeruvat pulpi, tavaliselt liiva ja vee segu. USA-s Pennsylvanias on 19. sajandi lõpust teada olemasoleva kiriku aluse antratsiidikaevanduse hüdrauliline tagasitõtmine. Meetodit peeti edukaks ja oli hiljem kasutuses umbes 25% USA antratsiidi kaevandustest. 20. sajandi algul levis hüdrauliline tagasitõtmine Euroopasse, kus seda kasutati Poola ja Prantsusmaa laavkaevandustes (Colaizzi, Whaite, ja Donner 1981). Hüdraulilise tagasitõtmena pumbataval segul on kaevandusvaringu korral summutav efekt ja ruum-tervik kaevanduste puhul annab parima tulemuse kui täidetud saab 90-100% tühimikest. Kuna segu on vedel ja voolab hästi tühimikes laiali, pole vaja väga tihedat tagasitõite puuraukude võrku. Samas eeldab meetod käikude perimeetrile pulbi laialivoolamise takistamiseks barjääride ehitamist. Probleemiks võib olla segust väljavoolava vee suur hulk. Ühtlasi ei pruugi segu jõuda käikudesse, mis pole juba toimunud varingute tõttu üksteisega ühenduses.

Tänapäeval kasutatakse rohkem tsementeeruva ja paksema konsistentsiga segu (pastat). Segupastale iseloomulikult on selles alla 20 µm osakesi üle 15 protsendi. Kõige tavapärasemalt kasutatakse tagasitõite pastades kivisöe lendtuhka ja tsementi. See meetod eeldab tihedamat tagasitõite puuraukude võrku. Kuna segu on vähem voolav, ei ole vajalik ulatuslike barjääride rajamine. Samuti on keskkonnakaitseliselt oluline, et segust väljavoolava vee hulk on väike, jäädes alla 5% (Sheshpari 2015). Ruumitõitmise efektile lisaks toimub segupasta kivistumine ja kivistunud materjal toetab kaevanduse lage. Ühendkuningriigi juhendmaterjalides peetakse enamuse ehitusobjektide puhul piisavaks, et segu saavutaks 28 päevaga survetugevuse 1-2 MPa (Parry ja Chiverrell 2019). Vajalik tihedam täitepuuraukude võrgustik vähendab täitmata jäänud tühimike võimalust. Eestis tehti ulatuslikke kivistuva seguga tagasitõitmise katseid töötavates Kiviõli ja Viru kaevandustes 1980-te teises pooles. Täiteseguna kasutati aherainet, põlevkivituhka ja liiva. Kiviõli kaevanduses täideti erinevatel meetoditel üle 30 000 m³ kaeveõõsi (Siitam 2016). Kuigi katsetõitmistel saavutatud tulemused olid tagasitõitmisega kaevandamise kasutuselevõtuks paljulubavad, peeti siiski odavamaks lahenduseks ruum-tervik kaevandamisele üleminekut. Oma Doktoriprojekti käigus katsetame praegu Kohtla-Järvel endise Käva kaevanduse streiki täitmist. Tagasitõitmiseks kasutasime vee ja põlevkivi lendtuha segu. 28 päeva kivistunud segust südamikpuurimisel võetud proovide survetugevused olid keskmiselt 7 MPa ja seega ületasid vajalikuks peetud 1-2 MPa. Tuhapastaga

täitmine võiks Eestis maapinna stabiliseerimisel kasutust leida nendes kohtades, kus hooned asuvad kaevanduskäikude mõjutsoonis, eelkõige varisemata strekkide alal.

Maapinnalt tagasitäitmise üheks eriliigiks on täitesegust toestussammaste (*grout columns*) valamine (Sahua ja Ritesh 2015). Lauslise kaevandustühimike täitmise asemel stabiliseeritakse lokaalne ala ohustatud hoone või infrastruktuuri objekti läheduses. Meetod sobib suuremate kaevandustühimike, näiteks strekkide toestamiseks. Tagasitäite seguks kasutatakse koos sideainega jämedamat materjali, mis pumbatakse puurauku kuni segust moodustub kaevanduse lage toetav koonusekujuline tervik. Seda meetodit on Eestis kasutatud Kukruse kaevanduse alal veostreki täitmiseks maantee ehitusel 2009. aastal (Valgma, Kolats, Karu 2010). Streki täitmiseks puuriti 27 puurauku vahekaugusega 7-8 m. Igasse puurauku pumbati 40-60 m³ põlevkivituha ja aheraine segu, millest tekkis 20-30° kaldenurgaga kaevanduse laeni ulatuv koonus (joonis 3). Täitematerjali katsekeha survetugevuseks määrati 6,2 MPa.



Joonis 3. Kukruse kaevanduse streki täitmine maantee ehitusel (Valgma, Kolats, Karu 2010)

Madalate kaevanduste ja eriti nende strekialadel olevad stabiilsusprobleemid on ajas pigem süvenevad. Nagu joonisel 3 näha, kasutati strekkide toestamiseks puitu, mis niiskes keskkonnas paratamatult pehkeb ja oma toetusomadused kaotab. Ettekandes on välja toodud erinevad kasutust leidnud kaevanduste pealse maapinna stabiliseerimise

meetodid, millest paljusid on ka Eestis testitud. Siiski on seni Eestis maapinna stabiliseerimisega tegeletud vähe ja alles probleemide ilmnemisel. Ehituse hoogustudes ja inimeste teadlikkuse kasvades väärivad vanad kaevandusalad, et nende stabiliseerimisega rohkem tegeletaks.

VIIDATUD KIRJANDUS

- Brook, D. 1994. Reclamation of abandoned underground mines in the UK. International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage
- Colaizzi, G. J. Whaite, R. H. Donner, D. L. 1981. Pumped-slurry Backfilling of Abandoned Coal Mine Workings for Subsidence Control at Rock Springs, Wyo EGF 20290. Riiklik Ehitusuuringute Instituut. Töö nr 2193X. Kohtla-Järve altkaevandatud piirkonna vajumiste mõõtmine (vene keeles). Geodeesia aruanne. Tallinn, 1983.
- Ehitisregister <https://livekluster.ehr.ee/ui/ehr/v>
- Karu, V 2012. Dependence of Land Stability on Applied Mining Technology. Energy and Geotechnology Doctoral School
- Maa ameti maardlate kaardirakendus <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maardlad>
- Parry, D. N. and Chiverrell, C. P. 2019. Abandoned mine workings manual, C758D, CIRIA, London, UK (ISBN: 978-086017-765 - 4) www.ciria.org
- Sahua, P. Lokhandeb R. D. 2015. An Investigation of Sinkhole Subsidence and its Preventive Measures in Underground Coal Mining. Global Challenges, Policy Framework & Sustainable Development for Mining of Mineral and Fossil Energy Resources (GCPF2015)
- Sheshpari, M. 2015. A review of underground mine backfilling methods with emphasis on cemented paste backfill. Electronic Journal of Geotechnical Engineering
- Siitam, L. O. 2016. Põlevkivi kaevandatud ala täitmisega lankkaevandamise tehnoloogiliste võimaluste uuringud Narva karjääri tingimustes. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool. Mäeinstituut
- Talviste, P. 2018. Kohtla-Järve altkaevandatud ala elamud Sinivoore, Ouokumpu ja Katse tn. Altkaevandatud ala stabiilsuse analüüs. IPT Projektijuhtimine OÜ
- Toomik, A. 1999. Allmaakaevandamise mõjud maapinnale ja nende hindamine. Liblik, J.-M. Punning. Põlevkivi kaevandamise ja töötlemise keskkonnamõjud Kirde-Eestis 6/1999 Lk 109-127
- Valgma, I. 1999. Mapping potential areas of ground subsidence in Estonian underground oil shale mining district. Environment. Technology. Resources 1999
- Valgma, I. Kolats, M. Karu, V. 2010. Streki toestamine põlevkiviaherainebetooniga. Maapõue kasutamise arengud lk 33-38. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus
- Vassiljev, J. Aarniste, M. Rebane, K. Urtson, K. 2018. Põlevkivi altkaevandatud alade varingute uuring. Tallinna Tehnikaülikooli geoloogia instituut
- Väizene, V. Valgma, I. Uibopuu, L. Kolats, M. Grossfeldt, G. Karu, V. Kuusemäe, K. Anepaio, A. Saarnak, M. Rusanov, F. Rahe, T. 2015. Põlevkivi altkaevandatud alade planšettide digitaliseerimine ja stabiilsushinnangu andmine. Tallinna Tehnikaülikooli Mäeinstituut

IDAVÖÖNDI GRAPTOLIITARGILLIIDI SETTIMISAEGSED REDOKSTINGIMUSED

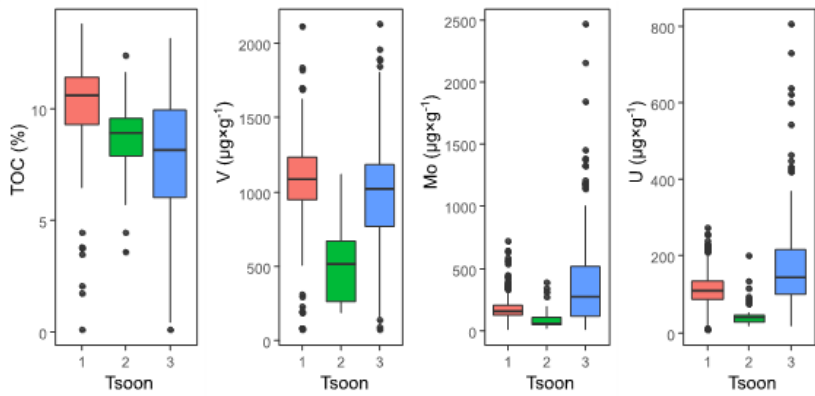
Johannes Vind

Kambriumi ja Ordoviitsiumi ajastutel toimusid Maa ajaloos suured muutused. Toimumas oli atmosfääri hapnikuga rikastumise viimane etapp, elustiku arengus leidsid aset Kambriumi plahvatus ja Ordoviitsiumi elurikkuse kasv (nn GOBE; Harper, 2006). Maailmamere hapnikusisaldus ei saavutanud ühtlast taset, vaid kõikus Kambriumis ja Kambriumi-Ordoviitsiumi üleminekul tugevalt, mõjutades ka elustiku arengut (Wei *et al.*, 2021). Idafaatsiese graptoliitargilliit on kui pilguheit Ordoviitsiumi alguse Balti paleobasseini keskkonnatingimustesse.

Paleokeskkonna uurimise viise on palju, üks neist on redokstundlike jälgelementide jaotuse tõlgendamine settekivimites (nt Tribovillard *et al.*, 2006). Graptoliitargilliit on tuntud oma kõrgeenenud molübdeeni (Mo), uraani (U) ja vanaadiumi (V) sisalduste poolest (Loog ja Petersell, 1994) — need ongi ühed kõige sagedamini kasutust leidvad redokstundlikud elemendid. Selles kirjatükis vaatleme, milliseid sissevaateid settimisaegsetesse tingimustesse pakub graptoliitargilliidi idafaatsiese kivimite keemiline koostis.

Graptoliitargilliidi idavööndiks või kolmandaks geokeemiliseks tsooniks loetakse ala, mis jääb Tapa joonest ida poole. Selle eristuse tingib üsna järsk jälgelementide sisalduste tõus võrreldes lääne poole jääva ala kivimitega (joonis 1; Pukkonen, 1989). Ajaliselt on idavööndi kivimid nooremad kui läänevööndi omad (Heinsalu, 1987). Niisamuti on Eesti Alam-Ordoviitsiumi Tremadoci graptoliitargilliit noorem kui temaga analoogne Kambriumi-ealine maarjaskilt Rootsi ja Taani aladel, mis kokku annab küllalt pika aegrea vaatlemaks Balti paleobasseini settimisaegseid keskkonnatingimusi, mis on salvestunud Kambriumi-Ordoviitsiumi mustadesse kiltadesse. Mõlemaid võib aga lugeda metallirikasteks kiltadeks (kitsamas tähenduses tähistatakse terminiga kilt eesti keeles küll enamasti moondekivimit).

Redokstundlikeks peetakse elemente, mis esinevad hapnikurikkas vees lahustunud vormides, kuid hapnikuvases, hapnikuta või H₂S-rikkas keskkonnas nad redutseeritakse ning moodustavad lahustumatuid faase,

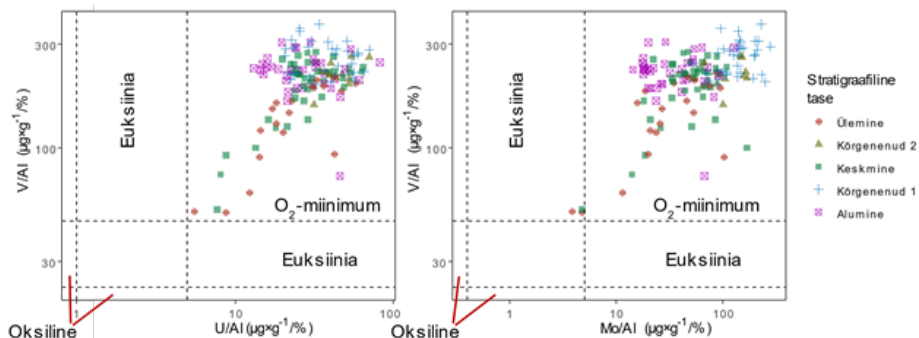


Joonis 1. Orgaanilise süsiniku (TOC) ja redokstundlike elementide muutlikkus graptoliitargilliidid geokeemiliste tsoonide lõikes. Tsoon 1 ulatub Hiiumaast Rapla-Paldiski jooneni, tsoon 2 kuni Tapa jooneni ning tsoon 3 ehk idavöönd on kõige idapoolsem. Keskvöönd on selgelt metallide poolest vaesem ning idavöönd on kõige uraani- ja molübdeenirikkam.

mis püütakse seejärel settesse. Näiteks uraan esineb hapnikku sisaldavas merevees lahustunud U(VI) vormis olles seotud karbonaatioonidega ning teda ei seota setetesse. Hapnikuvaestes tingimustes algab uraani redutseerumine mittelahustuvasse U(IV) vormi ning hapniku puudumisel uraani sadenemise intensiivsus kasvab. Kuigi U, Mo ja V redutseeruvad ja sadenevad setetesse üldjoontes sarnaselt, on nende sadestumisel ka erinevusi. Näiteks algab U sadenemine varem kui Mo-l, U sadenemine ei sõltu niivõrd H₂S olemasolust võrreldes Mo ja V-ga. Mo ning V seonduvad erinevalt U-st aga kergesti mangaani (Mn) ja raua (Fe) oksühüdrosiididega (Tribouillard et al., 2006). U, Mo ja V peetakse headeks redokstingimuste indikaatoriteks, sest nende sissekanne detriitsete mineraalide koosseisus on väike ning neil on pikk viibeaeg ookeanivees. Pika viibeaja tõttu on nende kontsentratsioonid maailmameres üsna ühtlaselt jaotunud. Samuti on nad väga vähesel määral seotud planktoniga ning seetõttu ei sõltu nende settesse kandumine bioproduktioonist (Liu ja Algeo, 2020).

Kaasaegsetes meredes on teada kahte tüüpi anoksilisi keskkondi (~0 µM O₂). Esimesed on kihistunud basseinid, millede vesi basseini põhjaosas on anoksiline ning sellised basseinid on rohkemal või vähemal määral piiratud maailmamere ühendusega, näiteks nagu Must meri. Teine keskkond on tõusuhoovustega seotud mandrilavadel, kus pindmise ja sügava vee vahel esineb anoksilise veega kiht ning veevahetus maailmamerega ei ole üldse

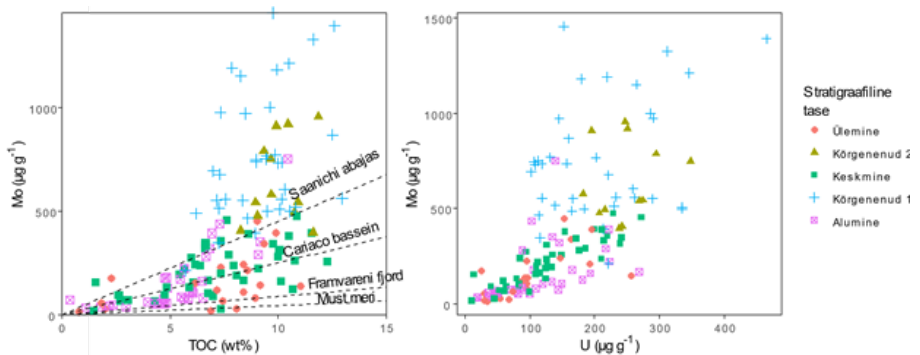
piiratud. Kaasaegsete anoksiliste mereosade ning setete uurimine on võimaldanud välja töötada kaudsed geokeemilised näidikud iidsete setete uurimiseks, mille puhul pole võimalik hapniku ja H_2S taset otse mõõta (Algeo ja Tribovillard, 2009). Kõige parema tulemuse annavad näidikud, kus Mo, U ja V on normaliseeritud alumiiniumi (Al) sisaldusega, mis vähendab detriitsetest mineraalidest tulenevat mõju (Bennett ja Canfield, 2020). Graptoliitargilliidi idafaatsiese proovid langevad Al-normaliseeritud näidikute alusel vahemikku, mis viitavad püsiva anoksiaga tsoonile ($\sim 0 \mu M O_2$), kuid ainult mõni üksik proov on vahemikus, mis viitab veesamba euksiiniale ($O_2 = 0 \mu M, H_2S > 0 \mu M$).



Joonis 2. V/Al, U/Al ja Mo/Al suhete graafikud, mis võimaldavad eristada iidsete setete oksilist, euksiinset ja hapniku miinimumi keskkonda

Toolse ja Aseri maardlate piirkondade graptoliitargilliidi puursüdamikes (18 südamikku, 144 proovi) võis tuvastada rööbistatavad stratigraafilised tasemed, mis on rohkem või vähem redokstundlikest elementidest rikastunud. Läbilõike allosas on kontsentratsioonid madalamad, seejärel on näha eristuvalt kõrgete Mo, U, ja V sisaldustega tase, millele järgnevad taas mõõdukamad kontsentratsioonid. Läbilõike ülaosas on jälle kõrgenenud kontsentratsioonid, kuid väiksemate väärtustega ning mitte kõigis puursüdamikes jälgitavad. Joonisel 3 on rohkem või vähem rikastunud tasemete proovid näidatud Mo ja orgaanilise süsiniku (TOC) ning Mo-U graafikutel. Kaasaegsete setete uurimisel on tuvastatud seaduspärad orgaanilise süsiniku ja Mo vahel, mis viitavad basseini suletuse määrale maailmamerega. Väga suletud anoksilistes basseinides, nagu näiteks Must meri, sadeneb Mo küll orgaanikarikkasse settesse, kuid ühenduse puudumise tõttu on kogu lahustunud Mo varu veekogus piiratud, seda ei

tule basseini juurde, ning kokkuvõttes jääb settese salvestuv Mo sisaldus madalaks, kuigi see korreleerub orgaanilise süsiniku sisaldusega. Teine äärmus on settebassein, mis on väga hea maailmamere ühendusega, ning kus lahustunud Mo varu sisuliselt ei ammendu, sest seda on hea ühenduse tõttu kogu aeg saadaval. Selline hästi uuritud näidisbassein asub Briti Kolumbias — Saanichi abajas (*Saanich inlet*). Nende kahe näite vahepeale jäävad Cariaco bassein Venetsueelas ja Framvareni fjord Norras (Algeo ja Lyons, 2007). Kui vaadelda vertikaalseteks ehk ajalisteks jaotisteks jagatud graptoliitargilliidi vastavaid andmeid, siis nähtub, et profiili allosas ehk kõige vanemates setetes on Mo sisaldused orgaanilise süsinikuga võrreldes väga madalad, mis viitab Framvareni fjordi taolisele küllalt suletud basseinile. Hilisemates episoodides, mis on iseloomustatavad mõõdukate jälgelementide sisaldustega, on bassein olnud tunduvalt rohkem avatud ning on võrreldav kaasaegse Saanichi abaja või Cariaco basseinile iseloomulike tingimustega. Basseini avatuse ja suletuse muutusi võib seletada merevee taseme muutuste või tektooniliste protsessidega. Läbilõike all- ja ülaosades on aga väga kõrged Mo sisaldused nii orgaanilise süsiniku kui U suhtes (joonisel 3: kõrgenenud 1 ja kõrgenenud 2). Nii kõrgeid Mo sisaldusi ei ole Norra, Rootsi ja Taani Kambriumi-Ordoviitsiumi-ealistes mustades kiltades enamasti tuvastatud (Andersson et. al., 1985; Bian, et. al., 2021). Sellised Mo ja TOC suhted ei sobitu enam basseini avatuse ja suletuse Mo-TOC mudelisse. Mo käitumise kohta on aga teada, et Fe ja Mn oksühüdrosiidid seovad endaga hästi Mo, kuid mitte U ning



Joonis 3. Mo ja orgaanilise süsiniku suhe viitab kaasaegsete keskkondade näitel basseini avatusele maailmamerega, kusjuures Must meri on kõige suletum süsteem. Punktiirjooned tähistavad Mo-TOC suhteid tänapäevastes keskkondades. Parempoolne graafik näitab Mo ja U suhet — mõõdukatel kontsentratsioonidel on jälgitav Mo ja U korrelatsioon, kuid kõrgete Mo kontsentratsioonidega ei käi kaasas kõrgemad U kontsentratsioonid.

see võib põhjustada kõrge Mo settesse sidumise taseme võrreldes U-ga. Seejuures ei pruugi Fe-Mn faasid ise settesse jääda, vaid lahustuvad taas. Sel viisil toimivad Fe ja Mn oksühüdroksiidid kui „süstikud“, mis toovad Mo settesse, kuid ise lahustuvad. Oksühüdroksiidide võimalik esinemine viitab aga mõningasele hapniku olemasolule. Teisalt võib suurenenud veesamba H₂S sisaldus eelistatavalt rohkem Mo võrreldes U-ga sadestada, kuid Al-suhete näidiku alusel ei ole euksiinsed tingimused vaadeldaval ajal domineerinud.

Idavööndi graptoliitargilliidi settimise ajal on Balti paleobasseinis jätkunud muutlikud redokstingimused, mis on esinenud ka varasemalt Kambriumi ajastul. Samas ei ole domineerinud euksiinsed H₂S-rikkad, vaid pigem anoksilised tingimused, kus veesambas on olnud ka vähesel määral hapnikku. Näib, et vaheldunud on avatuma ja suletuma basseini tingimused maailmamerega ühenduse mõttes, kusjuures vanemad settekihid on tekkinud suletuma basseini tingimustes.

VIIDATUD KIRJANDUS

Algeo, T. J., & Lyons, T. W. (2006). Mo–total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions. *Paleoceanography*, 21(1).

Algeo, T. J., & Tribovillard, N. (2009). Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum–uranium covariation. *Chemical Geology*, 268(3-4), 211-225.

Andersson, A., Dahlman, B., Gee, D.G., Shäll, S., (1985). The Scandinavian alum shales. *Sveriges Geologiska Undersökning*, Uppsala.

Bennett, W. W., & Canfield, D. E. (2020). Redox-sensitive trace metals as paleoredox proxies: a review and analysis of data from modern sediments. *Earth-Science Reviews*, 204, 103175.

Harper, D.A.T. (2006). The Ordovician biodiversification: Setting an agenda for marine life. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 232, 148–166. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.07.010>

Heinsalu, H. (1987) Põhja-Eesti tremadoki setendite litostratigraafiline liigestus. *Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised* 36 (2), 66–78.

Liu, J., & Algeo, T. J. (2020). Beyond redox: Control of trace-metal enrichment in anoxic marine facies by watermass chemistry and sedimentation rate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287, 296-317.

Loog, A., & Petersell, V. (1994). The distribution of microelements in Tremadoc graptolitic argillite of Estonia. *Tartu Riikliku Ülikooli Toimetised*, 972, 57–76.

Pukkonen, E.M., (1989). Макроэлементы и малые элементы в граптолитовом аргиллите Эстонии. *Oil Shale* 6, 11–18.

Tribovillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T. and Riboulleau, A., (2006). Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical geology*, 232(1-2), 12-32.

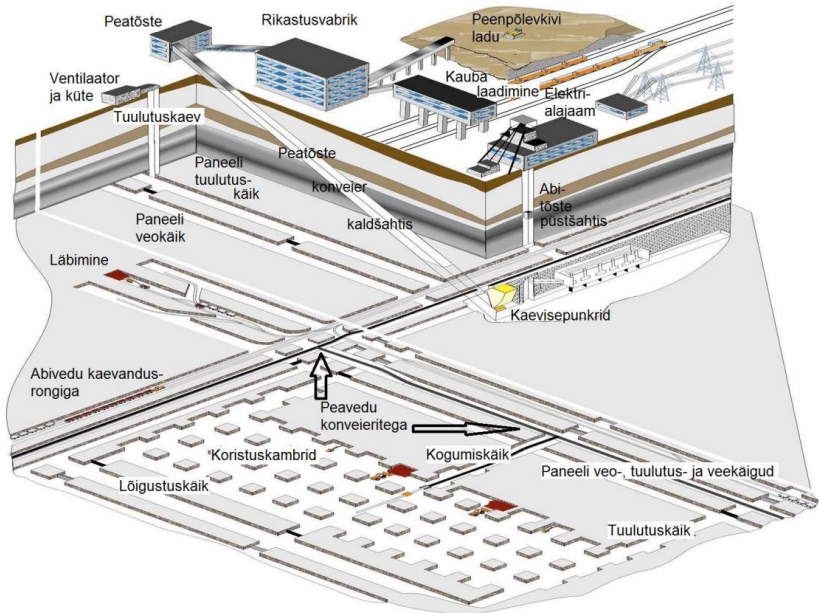
Wei, G.-Y., Planavsky, N.J., He, T., Zhang, F., Stockey, R.G., Cole, D.B., Lin, Y.-B., Ling, H.-F., (2021). Global marine redox evolution from the late Neoproterozoic to the early Paleozoic constrained by the integration of Mo and U isotope records. *Earth-Science Reviews* 214, 103506. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103506>

GEOLOOGINA ESTONIA KAEVANDUSES

Eelika Kiil

Ida-Virumaa geoloogia üheks lahutamatuks osaks on põlevkivi ja selle kaevandamine ning seega ei saa kuidagi kõrvale jätta sel aastal oma 50. sünnipäeva tähistavat Estonia kaevandust. Minu teed Estonia kaevandusega ristusid esmakordselt 2019. aasta magistriõpingute ajal, kui oma juhendaja, Martin Liira, ja teiste Tartu Ülikooli teadlastega uurisime põlevkivi geokeemilise muutlikkuse ja põlevkiviõli kvaliteedi vahelisi seoseid. Peale magistriõpingute lõppu suundusin sealt edasi tööle Estonia kaevandusse.

Selleks et hoomata Estonia kaevanduse mõõtmeid, on kõige parem võrrelda seda Tallinna linnaga. Nimelt on Tallinna linn (159,4 km²) pindalalt vaid 17,6 km² suurem Estonia mäeeraldise pindalast (141,8 km²) (Maakatastri statistika; Maardlate kaardirakendus). Sõit maa alla toimub mööda 800 meetri pikkust kaldteed ligikaudu 60 meetri sügavusele.



Joonis 1. Estonia põlevkivikaevanduse skemaatiline joonis (Reinsalu, 2016).

Estonia maa-alune teedevõrgustik on 120 km pikk, olemas on kõik oluline valgusfooridest kuni teed juhatavate liiklusmärkideni. Kogu kaevandus kasutab maa all liikumiseks autotransporti, mis aastal 2005 vahetas välja endised kaevandusrongid. Autoga sobivasse sihtkohta jõudmine hommikuse tipptunni ajal võib võtta kuni tunni.

Kaevanduses tehakse nalja, et võrreldes Narva karjääri kolleegidega, on maa all töötamisel ainult üks eelis – sooja on aastaringselt 8 kraadi (Uustalu, 2017). Olgu väljas -30°C või $+30^{\circ}\text{C}$, paduvihm või tormituul, karjääris valikut ei ole, tööd tuleb teha iga ilmaga (Uustalu, 2017). Selleks, et esimest korda maa alla pääseda, tuleb läbida ohutusinstruktaazid ja lugeda lehekülgede kaupa ohutusjuhendeid. Kuid maa all olles saab üsna kiirelt selgeks, miks seda kõike vaja oli – iga järgmise nurga taga võib varitseda mõni oht. Liikudes tuleb olla väga tähelepanelik, et ei astuks maasse rajatud veekõrvaldussoonde, laevaringu ohutsooni või liikuva puurpingi ette.

Geoloogi üheks peamiseks ülesandeks on tagada mäetööde ohutu kulgemine muutlikes geoloogilistes tingimustes. Olulisemateks geoloogilisteks teguriteks, mis muudavad kaevandamise keerulisemaks, on põlevkivi tootsa kihindi ja ümbriskivimite lõhelisus ja karstumus. Lõhed



Pilt 1. Karst Estonia kaevanduses, autor Olena Stolika.

esinevad loode-kagu ja edela-kirdesuunalistena, võivad olla nii suletud kui ka avatud kujul, täitunud kaltsiidi, savika materjali või liivakiviga. Karstisoonid on üldiselt välja arenenud piki edela-kirdesuunalisi, algselt liivatäitega lõhesid, kus hiljem on põlevkivi asendunud karstisaviga. Põlevkivi ja savi kontaktil esineb enamasti kitsas, musta värvusega oksüdeerunud põlevkivi ääris. Nii karsti- kui ka suuremaid lõhetsoone püütakse võimalusel vältida, kuid kui see võimalik ei ole, siis jäetakse suuremad kaitsetervikud, toestatakse seinad ja laed vajadusel täiendavate puitkonstruktsioonidega või minnakse üle teistsugusele laekõrgusele. Lõhede ja karstisoonide paiknemine kaeveõõnes fikseeritakse mõõdistuspunktide kaudu. Eriti oluline on karstisoonide dokumenteerimine koos fotografeerimisega, sest nende andmete alusel esitatakse Eesti Maavarade Komisjonile põlevkivivarudest karstialade mahaarvamise taotlusi (Kattai et al., 2000).

Estonia kaevanduses kaevandatakse kahe laekõrgusega – 2,8 ja 3,8 meetrit, kõrguse valik sõltub vahetu lae püsivusest. Kui tekib olukord, et lage ei ole võimalik nii toetada, et see ei kujutaks ohtu inimeste tervisele ja tehnikale, siis minnakse üle kõrge laega kaevandamisele. Kuigi kogu kaevandus on üsna suures osas läbi uuritud ja puuritud, tuleb ikkagi ette, et nõrgenenud laetugevusega aladel tuleb läbi viia uusi puurimisi, et kontrollida lae tugevust, kihtide paiknemist ja omadusi. Kihipiirid pannakse paika vastavalt puurimiskiiruse ja sõelmete värvuse muutumisele. Vajadusel tehakse korrektuurid lae toestamiskeemides ja ankrute paigaldamises, nende pikkuses ning selles, millisesse kihti ankrud tuleb kinnitada.

Kui töö kaevanduses on tehtud ja lõpuks tagasi maa peale jõutud, algab töö arvuti taga AutoCAD ja Credo programmidega. Kogutud andmed kantakse ühtsesse süsteemi, et need oleksid kõigile kättesaadavad. Vajadusel koostatakse geoloogilised ettekirjutused, mille alusel toimub kaevandamisparameetrite muutmine. Iga kuu lõpus esitatakse kamberplokkide ja ettevalmistuskaeveõõnte kaevandamismahtude aruanded, kus võetakse arvesse nii kaevandatud põlevkivi, kui ka tervikutesse jääv maha kantav varu koos karstisoonide ja karstieelsete tsoonidega. Põlevkivi kvaliteedi osakond tagab mäemassi arvutusteks vajalikud põlevkivi parameetrid, geoloog peab lisaks arvesse võtma veel näiteks tootsa kihindi väljamiskõrguse ja geoloogiliste plokkide erikaalude erinevused. Saadud andmed jagatakse nii mäeeraldiste kui ka geoloogiliste plokkide vahel. Kui aktid on koostatud ja kaevandamismahud edastatud,



Pilt 2. Laekivimite puurimine, erakogu

täiendatakse digitaalseid ja ka paber kandjal olevaid mäetööde plaane, mis on olulised näiteks mäepäästjatele ja kaevanduse peadispetšerile.

See kõik moodustab suure osa geoloogi argipäevast, kuid erinevaid ametiülesandeid jagub veel kõige selle kõrvalt. Üks mis on kindel – geoloogi ametikoht on kaevanduses väga oluline ja vastutusrikas, pakub piisavalt väljakutseid ja võimalusi enesearenguks neile, kes seda soovivad.

VIIDATUD KIRJANDUS

Kattai, V., Saadre, T., Savitski, L. (2000). Eesti põlevkivi: geoloogia, ressurss, kaevandamistingimused. Tallinn, Eesti: Akadeemia trükk.

Maakatastri statistika. Kasutamise kuupäev: 26.08.2022. Allikas Maa-ameti geoportaal: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/andmed-ja-kaardid/maakatastri-andmed/katastriuksuste-statistika-p506.html>

Maardlate kaardirakendus. Kasutamise kuupäev: 26.08.2022. Allikas Maa-ameti geoportaal: <https://xgis.maaamet.ee/xgis2/page/app/maardlad>

Reinsalu, E. (2016). Eesti mäendus: mäeinseneri õpik. Tallinn, Eesti: Tallinna Tehnikaülikool.

Uustalu, A. (2017). Kaevuri elu maa all: kaheksa niisket kraadi üle nulli ja muttmasin. Õhtuleht, 02.09.2017.

KUKERSIINI LEVIKUST JA TEKKEST

Rein Einasto, Aat Sarv

Põlevkiviga seondub Virumaal kindlasti tõsiseim probleemkond nii geoloogilises, keskkondlikus kui ka sotsiaal-majanduslikus sfääris. Sellest tuleneb ka antud teemavalik. Selleks, et seatud küsimusele kukersiini tekkest teaduspõhiselt vastata, peaksime küllap sügavamalt tundma ka sapropeelmuda moodustanud organismide bioloogiat. Seetõttu on alljärgnev kukersiinse sapropeeli massilist tekkimist, mattumist ja säilumist käsitlev mõtisklus küll faktidele toetuv, aga suuresti arvamuspõhine. Põhiprobleemideks on kerogeense orgaanika säilumise eeldused – kukersiini kobarterade kõdunemiskindel kapseldumine hapnikurikkas elukeskkonnas ja savirikka kukersiinmuda kiire kivistumine.

Kukersiin on kukersiidi kerogeenne (orgaaniline) komponent, sinivetika *Gloeocapsomorpha prisca* kapseldunud ja kivistunud terad. Selle tabava nime soovitas Aile Kõrts (vt Kõrts, Einasto 1990). Kivimimoodustajana piirdub kukersiini stratigraafiline ja geograafiline levik kukersiidi kui eripärase kivimi levilaga Kirde-Eesti ja Ingerimaa Kõrgekaldal ja Viivikonna kihistus. Üksikud õhukesed kukersiidi vahekihid on kindlaks tehtud ka Eesti paelasundi nooremates kihtides: Haljala lademe Vasavere kihistus avamuse põhjaosas ja Raikküla lademe Saarde kihistu ülaosas (Ikla südamik, foto 1, sügavus vt Kõrts jt., 1991). Rohke lisandina kivimis teame kukersiini lokaalset esinemist Loode-Eesti Pakri kihistus (Orviku, 1960, Suuroja; Saadre; Kask, 1999; Saadre, Suuroja 1993). Hajutatult tasemeti lubjakivis on kukersiini esinemise kindlaks teinud Lembit Põlma (1972, 1982) enamikus Põhja-Eesti Ordoviitsiumi lademetes



Foto 1. Kukersiidi vahekiht Saarde kihistu ülaosas Ikla puursüdamikus.

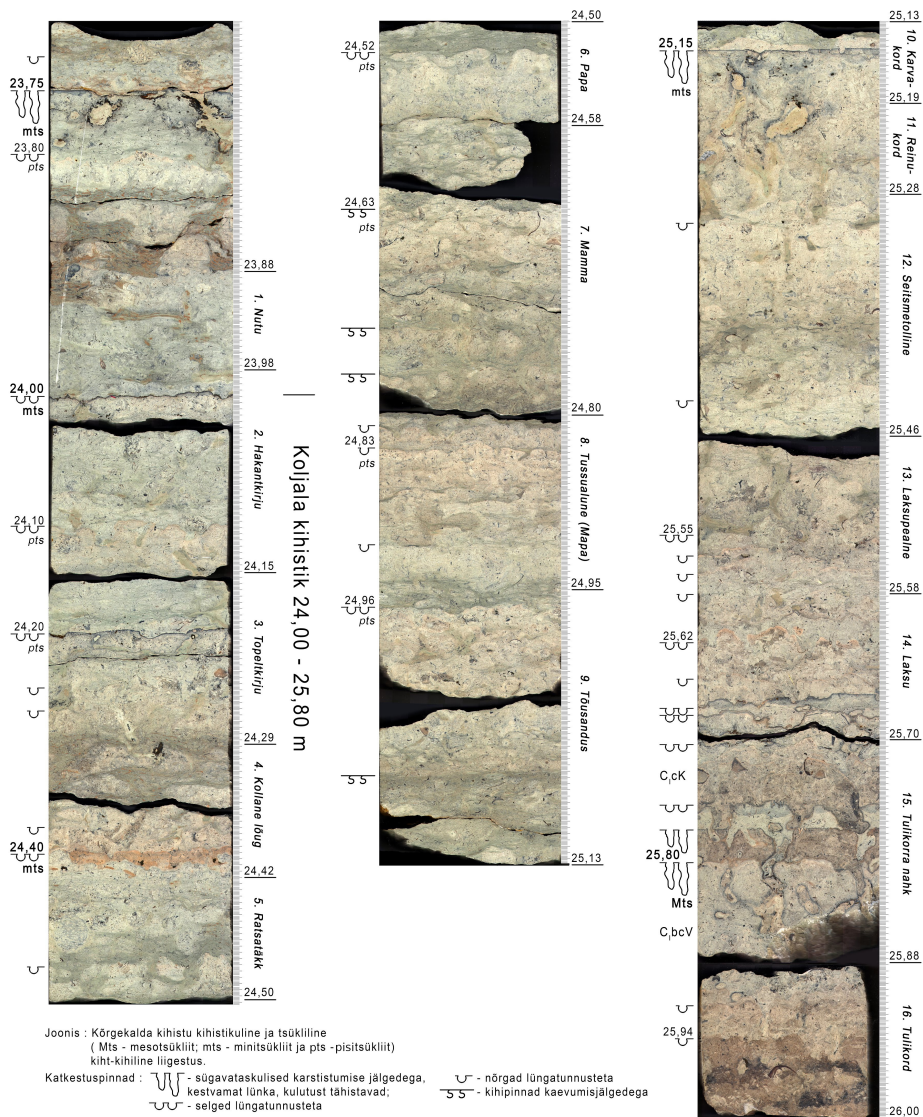


Foto 2. Koljala kihistiku läbilõige Ülemiste puursüdamikus. Ehituslubjakivi kihtides „Kollane lõug“ ja „Nutu lagi“ on kukersiinpaestu esimesed kukersiiniilmingud. Kihistiku piiridel ja sügavuses 25,15 m on taskulised, intensiivselt püriidistunud karstustumisjälgedega katkestuspinnad. Kihtideks liigestus Rein Einasto, digitöötlus Andrus Rähni.

avamuse-lähedasel alal. Kukersiini viimane esinemine Eesti paelasundis on fikseeritud Jaagarahu lademe Maasi kihtide basaalses osas avamusel (Einasto, 1981).

Paelasundit, milles valdava osa moodustavad kukersiinpaas ja kukersiit, on autorite ettepanekul nimetatud kukersiinpaestuks. Selle paestu alumine piir ühtib üldjoontes Tallinna ehituspaestu ülemise piiriga Koljala kihistiku ülaosas (foto 2), ülemine piir kulgeb Viivikonna kihistu ülemise piiri-katkestuspindade seeria sees.

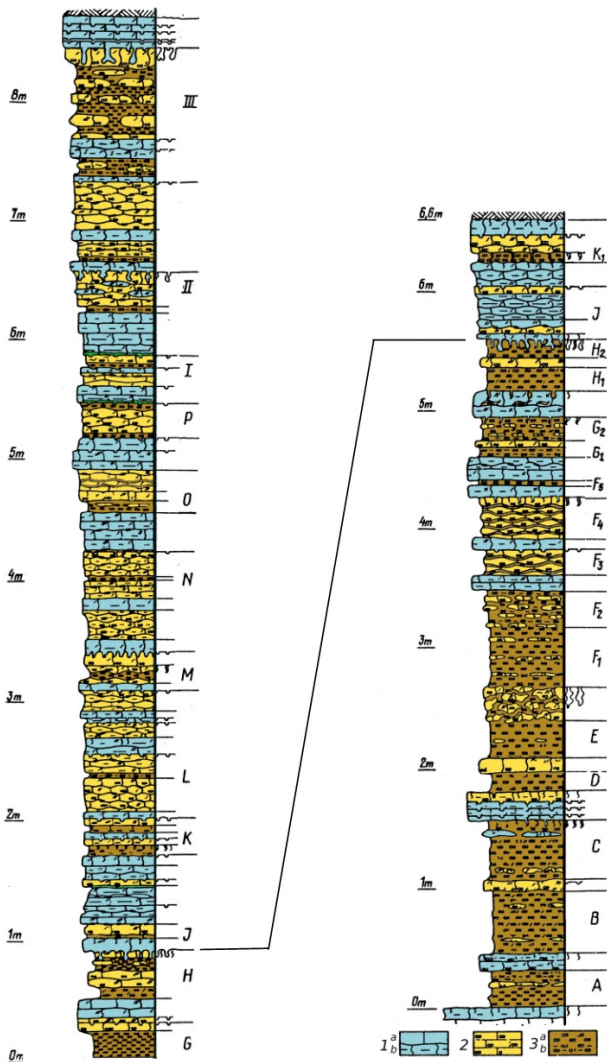
Kukersiidi uurimise ja kasutamise ajaloost on hea ülevaate koostanud Aasa Aaloe (1989). Tema järgi esimesed ülestähendused „põleva mulla” olemasolust Kohtla ümbruses pärinevad juba 1725. aastast Johann Anton Guldensstädti reisikirjast ja August Wilhelm Hupeliilt (1777). Teaduslikud käsitlused algavad Johann Gottlieb Georgist (1791), jätkuvad G. Helmerseni (1839), Fr. Schmidt (1858, 1891) töödes, kus kukersiidiladungid saab iseseisva stratooni – Kukruse lademe tähenduse. Mihhail Zalesski (1917) tegi kindlaks kukersiini merevetikalise (sapropeliitse) päritolu, nimetades selle fossiilse liigi *Gloeocapsomorpha prisca*’ks ja põhjendas kukersiini allotigeensuse – mattumispaika sissekandumise. Kukersiidi lubjakiviga korduva vaheldumise põhjuseks pidas ta mere sügavuse järske muutusi.

Kukersiini sisaldavate kihtide geograafiline levik ja lateraalsed muutused avamuse-lähedasel alal on kaevanduste planeerimisel detailselt kaardistatud ja kirjeldatud. Põhjaliku kiht-kihilise stratigraafilise ja litofatsiaalse käsitluse kogu kukersiidi levila piirides on esitanud autorite rühm Ralf Männili eestvedamisel (Männil jt, 1986). Selles käsitluses leiame põhimõtteliselt uue kukersiini tekkimise hüpoteesi. Kukersiini tekkekeskkonnana põhjendatakse madalšelfi elurikka mattumiskeskonna kaldapoolses naabruses olevat null-settimise (katkestuspindadega, Roman Heckeri väljenduse järgi kaljuse merepõhjaga) avarat, väga madalat veealust paeplatood, kust kukersiin koos kirdepoolselt kulutusalt sissekantud saviga kanti edasi kas tõusu-mõõna- või(ja) ühesuunalise pinnahoovuse toimel sügavamasse normaalmerelisse elurikkasse mattumis-keskkonda madalšelfil. Käsitluses rõhutatakse kukersiini sisaldavate kihtide märkimisväärset väljapeetust, igas järgnevas nooremas kihis maksimaalse paksuse vööndi seaduspärast nihkumist avamere suunas ja kukersiini massilise tekke ja mattumise perioodilist paljukordset (40 erivanuselist kihti) katkemist ja taastumist enam-vähem samas piirkonnas ligi 3,5 Ma vältel.

Kukersiinpaestule on sarnaselt Tallinna ehituspaestuga iseloomulik

Maidla karjäär

Kohtla karjäär



Joonis 1. Kukersiinpaestu litofatsiaalsed läbilõiked stratotüüpetes Kohtla ja Maidla karjääris (Kõrts, Einasto, 1990). Selgub kihtide järjestuse ja tsükliitide siseehituse märkimisväärne variaablus. Kiht-kihiline liigestus ja litoloogiline iseloomustus Rein Einasto, digitöötlus Aat Sarv. Tingmärgid: 1 - kukersiinivaba lubjakivi ja savikas lubjakivi, 2 - kukersiinlubjakivi ja kukersiin-merkivi, 3 - kukersiid.

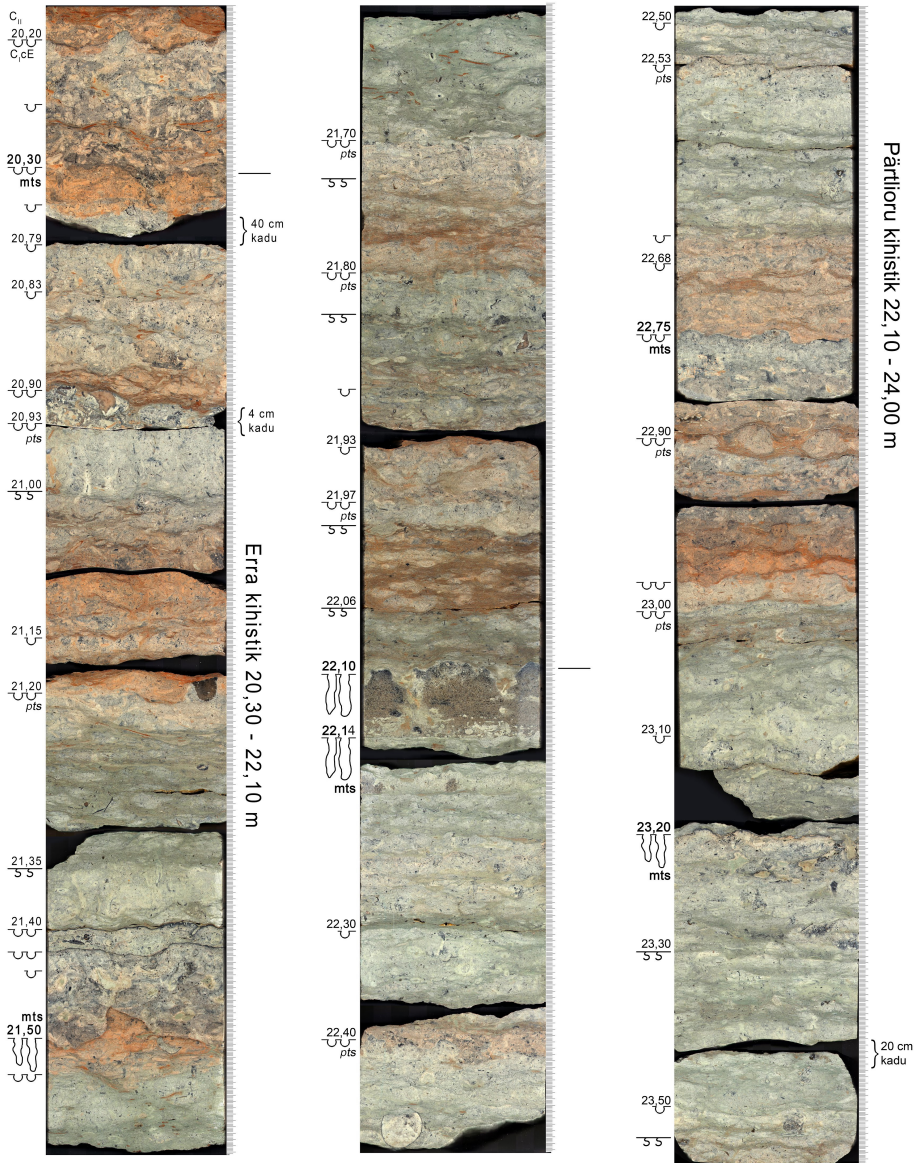


Foto 3. Pärtlioru kihistiku ülaosa ja Erra kihistiku läbilõige Ülemiste puursüdamik. Minitsükliitide piiridel on kulutusjäljed. Pitsitsükliitide piirid paiknevad lubjakivikihtide ülemisel, katkestuse jälgedega pinnal. Kukersiin esineb lisandina nii savikas lubjakivis kui lubimerkivis. Kihtideks liigestus Rein Einasto, digitöötlus Andrus Rähni ja Aat Sarv.

vahelduvate kihtide ulatuslik horisontaalne väljapeetus ja ebareeglipärane tsükliiline kordumine. Lamavast ehituspaest erinevalt ei tõuse katkestuspinnad nii selgelt esile, nende sagedus on väiksem, kestvus ilmselt lühiajalisem. Selgemad neist esinevad minitsükliitide piiridel, enamasti lubjakivikihi sees, selle alumisel või ülemisel piiril (joonis 1). Pole välistatud, et me kukersiidi-siseseid katkestusi ei oska märgata. Suure suurendusega võib poleeritud lihvi digipildil eri settetüüpide selgeid kontaktpindu jälgides tõdeda, et nende pindade, ka kukersiinmuda kõvastunud ebatasasel pealispinnal vastu lasuvat savikat või kukersiinjat lubisetet on lühiajaline settelünk ilmne. Kas neid nõrga fosfaatses või püriitse impregnatsiooniga pindu lugeda katkestuspindadeks, on arutelu küsimus (foto 3).

Minitsükliitide ehituses ilmneb märkimisväärne varieeruvus: kukersiit võib esineda otse piirikatkestuspinna peal või tsükliidi keskel, harva ka vastu ülemist piiri. Sageli näeme mõningast ebakorrapärast sümmeetriat: piiri-katkestuspinna all ja peal esineb vähese savisisaldusega kukersiinlubjakivi, tsükliidi keskel – horisontaal-mikrokihiline kukersiit. Erinevate kivimtüüpide kontaktid võivad olla nii selged tasased pinnad kui siirdelised üleminekud. Minitsükliidi alaosa moodustab enamasti hall peendetriitjas savikas lubjakivi. Mitme minitsükliidi piiril on vahetult katkestuspinna peal õhuke kukersiinivaba merkivi kihike, teisel on selline savikam kukersiinivaba sete säilinud ainult piiri-katkestuspinna süvikutes (joonis 1, fotod 2-4).

Kukersiinpaestu võime jagada kolmeks põhiosas regressiivseks mesotsükliidiks. Avamuse-lähedasel alal (kõige kaldalähedasemas piirkonnas) on nende piirideks püstakulised, selgete karstumisjälgedega, kestvamale lüngale viitavad püriitsed kulutuspinna: Väo kihistu ülemisel piiril, Kohtla kihistiku H-kukersiidi-kihendi ja Peetri kihistiku III kukersiidi-kihendi (Tapa maardla) lael* ning Viivikonna kihistu ülemisel kulutuspinna, mis markeerib lamavate kihtide lauged põiksust (joonis 2). Viimane tähistab makrotsükliidi ülemist piiri. Selle alumiseks piiriks on Kunda lademe Loobu ja Pakri kihistute alumine piir, markeerides ühtlasi Hunderumi vanusega stratigraafilist lünka Eesti ja Ingerimaa paelasundis.

Alumises, stratigraafiliselt ja ajalisel kõige ulatuslikumas mesotsükliidis (ClcK – ClIK) võib täheldada mõningast sümmeetrilist ehitust, mille murdepinnaks on katkestuspind kaksikpae alumisel piiril. Kaksikpae kahe tootsa kihendi A-C ja D-F vahel on kõige ilmekamaks halli lubjakivi esinemise näiteks, tähistades meretõusu ühte maksimumi, lühiajalist avašelfile

iseloomuliku sub-turbulentse settimise režiimi tekkimist kukersiini mattumisalal (foto 4).

Keskmes mesotsükliidis (CIIM – CIIP III) on kukersiinivaba lubjakivi ja kukersiinpaas koos kukersiidiga enam-vähem võrdses vahekorras, seejuures alumises osas (J ja K-kihid) valdab lubjakivi, ülemises osas (CIIP III kiht) – selgelt kukersiit kukersiinpaaga, viidates mesotsükliidi regressiivsele lõpufaasile (joonis 1).

Ülemises mesotsükliidis (CIIP IV – CIIP X) väljendub väga selgelt kukersiini maksimaalse kuhjumisala ulatuslikum nihkumine avamere suunas igas järgnevas minitsükliidis ja kukersiini kuhjevööndi laiuse vähenemine (joonis 2). Erinevalt eelmistest mesotsüklitest lõppevad siin minitsükliidid kukersiinivaba lubimuda settimiselega.

Kukersiinpaestu üldistatud fatsiaalne profiil meridionaalselt Tatrusest Ima-vereni (joonis 2), on koostatud Heiki Bauerti litotulpade alusel (vt Männil jt 1986). Profiilil avalduvad selgelt sujuvad fatsiaalsed üleminekud: kukersiini sisaldavate kihtide paksuse ja kukersiinisalduse järk-järguline vähenemine ja karbonaatsuse suurenemine avamere suunas kuni kukersiinivaba savika lubjakivini. Sama-laadne kihipaksuste vähenemine toimub ka kukersiinivabades lubimerkivi kihtides kukersiinpaestu alumises osas Pärtlioru kihistikus. Merkivi, kukersiidi ja kukersiinpaas maksimaalse paksuse vöönd nihkub järgnevais nooremais kihtides

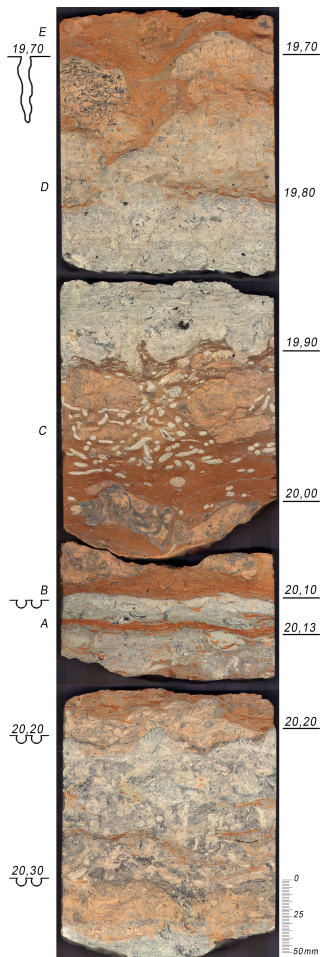


Foto 4. Kohtla kihistiku alumine osa Ülemiste puursüdamikus. Kihistiku alumine piir on lainjas nõrgalt püriitne katkestuspind sügavuses 20,2 m. Käikude täitumine lasuva kihi heleda lubisetega, eriti selgelt „Kaksikpae“ lamavas C-kihi kukersiidi ülaosas („Hobusenahk“) kinnitab, et kukersiinmuda pidi olema piisavalt kõvastunud, samas piisavalt pehme uuristajate elutegevuseks, aga kukersiinjas lubimuda muguladena pidi olema juba pooltsementeerunud, pidurdades sama infauna elutegevust.

reeglipäraselt edela, st avamere suunas. Joonistub välja settebasseini külgtäitumise tulem madalšelfi väga laugel nõlval, sarnaselt Siluris madal- ja süvašelfi suuremate sügavusmuutustega üleminekualal (Einasto 1995, joon 2; Einasto jt, 2013 joon 6). Kukersiinpaestu fatsiaalsel profiilil väljendub kukersiini ja savikomponendi sedimentoloogiline seotus: kõige kaldalähedasemas, hilisemast kulutusest puutumatuks jäänud vaikseveelises sublaguunses vööndis lauge nõlva jalamil settib üheaegselt nii kukersiini kui ka põhiosa sissekantud savist, ent peliitsem osa sellest savist on osaliselt kandunud kukersiinist ka kaugemale avamerele, kus see on mattunud madalikuvööndist sügavamal lubisette koosseisus, olles kivistudes muutunud merkivi-kelmetega savikaks lubjakiviks. Rõhutame veelkord, üldise regressiooni käigus nihkus kukersiini ja savi koos-settimisvöönd tsükliliselt avamere suunas.

ARUTELU

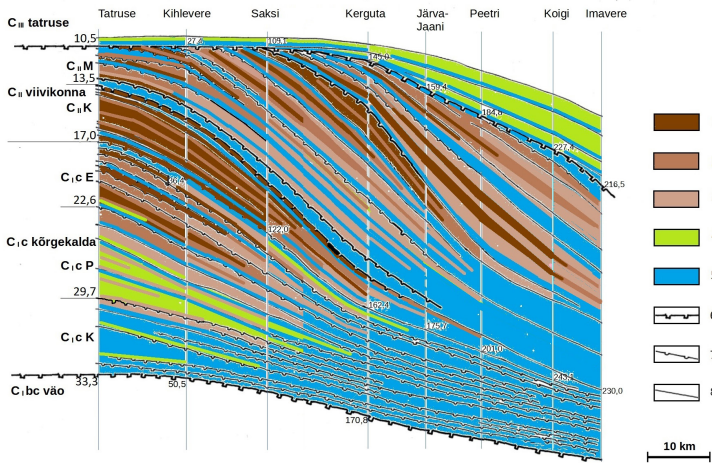
Aeg on järele mõelda, milline oli varjatud madalšelfi kaldalähedane vaikseveeline settimisruum kukersiini ulatusliku tekkimise, settimise, mattumise ja kiire kivistumise ajal, kus väga ulatuslikul alal kukersiini settimine aegajalt katkes ja taas kordus. Kuidas mõista Balti paleobasseini epikontinentaalses arengufaasis laial varjatud šelfiil püsiva lainetuse mõjuga madalikuvööndit? Kas katkestuspinnad oligi kogu ulatuses tolle arengufaasi madalik? Kuhu settisid liikuvaveelised teralised kaaneliivad? Kuidas nägi välja veealune null-settimisruum laudtasasel, küll kõvastunud, ent enamasti veel mitte kivistunud paepõranda kohal kogu katkestuspindade laia leviku ulatuses? Missugune veerežiim suutis sissekantud settematerjali kestvalt hõljuvas olekus hoida ja milline protsess selle vaikseveelisse settimisruumi transportis? Kas tõusu-mõõnahoovustest piisas? On, mille üle arutleda.

Ilmselt toimis ka ühesuunaline pinnahoovus, mis, arvestades kontinendi asendit lõunapoolkera pöörjoonel, tähendas püsivaid kagupassaattuuli mandri poolt, pannes pinnavee liikuma kaldast eemale ja põhjustas sellega toitaineterikka süvahoovuse pinnaletõusmise (*upwelling*) Baltika kontinendi lääneküljel. Põhjalikult on termohaliinse globaalse paleotsirkulatsiooni toimemehhanisme tänapäeva ookeanide süvahoovuste alusel käsitlenud Jelena Ivanova (2006), koostöös abikaasa, maailmakuulsa okeanoloog Ivar Murdmaaga. Toitaineterikkas süvahoovuses võiks näha üht põhjust Balti basseini madalveelise šelfiala

elurikkusele.

Kukersiini tekkimise, mattumise ja kivistumise põhiprobleemideks on kukersiinvetika massilise vohamise elukeskkonna eripära, suure vetik-biomassi kobarterade kapseldumise protsessid teekonnal mattumispaika (lähtudes allohtoonsesest tekkehüpooteesist) ja kukersiinse orgaanilise aine säilumine elurikkas mattumiskeskkonnas enne sette kivistumist. Lähtealuseks võiks olla teadmine kukersiini massesinemise geneetilistest seostest savikomponendiga nii tüüpilises kukersiidis (1/3 kerogeeni), kui ka pisut väiksema kukersiinisaldusega kukersiinpaeas ja kukersiinjas merkivis. Oluliseks alusteadmiseks on ka kukersiinmuda ja kukersiinvaba savika lubimuda võrdselt intensiivne bioturbeeritus, elurikkuse tagajärjed sette pinnal ja sees, naaberkihtide sette osaline segunemine, püstakute sagedus, mitmete settimisaegsete tekstuuri (mikrokihilisuse) mõningane kustumine, hävimine (Toom, 2019). Mõnedki õhukesed sortimata-detriitised (2-4 cm paksused) vahekihid on säilunud üksnes katkendlike läätsetena bioturbeeritud mudakihtides (fotod 3, 4).

Vetik-kobarterade orgaanika säilimise tingimatuks eelduseks elurikkas



Joonis 2. Kukersiinpaeustu üldistatud fatsiaalne profiil Tatruste – Imavere liinil Heiki Bauerti koostatud litotulpade alusel (Männil, Bauert, 1986) täiendustega. Digitöötlus Aat Sarv.

Tingmärgid: 1- kukersiit, 2 - savikas kukersiinpaeas savika kukersiidi lainjate vahekihtidega, 3 - kukersiinjas savikas lubjakivi kukersiinja lubimerkivi lainjate vahekihtidega, 4 - merkivi õhukeste savika lubjakivi mugulate ja vahekihikestega, 5 - sortimata-detriitjas poolmuguljas savikas lubjakivi merkivi õhukeste lainjate kelmetega, 6 - stratigraafilist lünka tähistav karstumisjälgedega kulutuspinna, 7 - olulisemad katkestuspinnad tsüklite piiridel. 8 - selged kihipinnad tsüklite piiridel.

meres pidi olema „kõdunemiskindel” kapseldumine. Üheks võimalikuks kapseldumise põhjuseks on peetud soolsuse erinevust kukersiin-vetikate eluala ja mattumiskeskonna vahel. Kobarteralise vetika massilise vohamise elualana oleks loogiline lugeda ulatuslikku rannalähedast mahkjastunud nullsettimise vööndit, kust tõusu-mõõna ja ühesuunalised pinnahoovused kandsid vetikterade massi normaalsoolsusega madalmerre. Kaitsemehhanismina toimus vetikterade kapseldumine. See oleks ilmselt küll vajalik, tõenäoliselt siiski mitte piisav tingimus „seedimiskindlaks” kapseldumiseks.

Ellujäämiseks elutähtsale kapseldumisele soolsuse muutumisel pidi omakorda järgnema kukersiinterade massi soodne settimine ja kiire mattumine ning seejärel ka lühiaegne kivistumine. Kas hõljuvas olekus kapseldunud kukersiin-kobarteradel võis olla võime siduda saviosakesi, mis soodustanuks settimist ja veelisest ümbriskeskonnast isoleerumist, kobarterade savisse mattumist ja kiiremat kivistumist? Elektronmikroskoopilised lõiked kukersiini kobarterast (Kõrts, 1992; Nõlvak, vt Aaloe jt 2006) kinnitavad nende elulähedast ümara-kujulist säilimist, millest võime järeldada, et kobarterade märkimisväärset mattumisjärgset kompaktsooni ei toimunud, samas lubitãitega ussikãikude horisontaalne lapikus savikamas kukersiidis ja savikas lubjakivis viitab selgelt nii pehme kukersiinsette kui savise lubisetle lähedasele mahu vähenemisele ligi kaks korda enne kivistumist. Kivistumise tsemendiks sai selles settimisruumis olla üksnes settesiseses vees üleküllastunud lubiaine – kaltsiit. Kukersiinmudas lisandina esinev rohke peliitsavi võis kapseldunud kukersiin-vetiksette muuta küll „vettpidavaks”, aga kas sellest piisas kukersiinkapsleisse suletud orgaanilise aine kestvaks säilimiseks? Kaugemale avamerele kantud kapseldumata vetikmass läks elurikkas meres ilmselt teistele organismigruppidele biosöödaks jälgi jätmata.

Vetikmassi vohamine põhjustas mõnede organismirühmade jaoks hukatuslikku „mürgisust”, hapnikuvaesust või -üleküllust, nagu seda täheldatakse ka kaasaegsete „veeõitsengute” puhul? Seejuures tuleb ka silmas pidada, et harjumuspärased hapnikusaldused nii atmosfääris kui ka hüdrofääri erinevates kihtides erinesid oluliselt tänapäevastest. Kukruse eal oli juba käimas Ordoviitsiumi elustiku suur mitmekesisustumise protsess, mis kahtlemata võis kaasa tuua ka globaalset hapnikutaseme perioodilist fluktueerumist, sarnaselt, nagu seda on näidatud Kambriumi ajastu kivimite näitel (He jt, 2019).

Kukersiidi lubimerkiviga võrdselt suur savisisaldus viitab sellele, et

savikomponendi sissekanne mandrialalt oli mõlema, geneetiliselt küll erineva kivimtüübi juures lähedane. Saviainese granulomeetriline ja ainealine koostis viitavad pikale teekonnale kulutusalt, milleks Balti kilbi penepaanistunud kristalliinne aluskord otse põhjas ei olnud tõenäoline. Ainus kõrgem kulutusala Baltika kontinendil võis tol ajal olla Uurali geoloogide andmetel Tremadoci eal Baltikaga pökkunud Timani mikrokontinent kirdes. Pökkumisega kaasnev maatõus põhjustas Põlaar-Uraalis konglomeraatide moodustumise suures paksuses, mis on selge tunnus ala märkimisväärsest pökkumisjärgsest kerkimisest.

Savisisalduse ja kihipaksuste seaduspärane kirdesuunaline suurenemine Balti põlevkivibasseini piires osundab savi ja kukersiini settimisruumi sissekandumisele samast suunast – kirdest. See protsess toimus „suure paksuste inversioonini” Kukruse ja Haljala aja piiril: enne suurenes kihtide paksus ja savisisaldus läänest itta, pärast inversiooni – idast läände, mis kajastub ka fatsiaalsel profiilil (joon 2). Inversiooni põhjustas Avalonia väikekontinendi mahe pökkumine Baltikaga praeguse Poola kohal kurrutumist esile kutsumata (Wikipedia. Avalonia).

Mis aga põhjustas massilise ja perioodiliselt aina intensiivistuva kapseldunud kukersiini sissekande settimisruumi just Uhaku ea Pärtlioru staadiumi alguses? Kas ainult madaldumise kriitilise lävi ületamine just sellel ajal? Tagajärjena muutis magevee juurdevool ülimaldala varjatud šelfimere paeplatool ulatuslikult mahkjaks, millega põhjustas kukersiinvetika massilise vohamaise ja selle produkti – kapseldunud hõljuvas olekus kukersiini – kandumise koos saviainesega settimiseks soodsasse keskkonda. Selle savirikka kukersiinmuda kujunemine eeldas vaikseveelist (sublaguunset) settimisrežiimi püsiva lainetuse madalikuvööndist kalda pool. Seni on lahti mõtestamata madalikuvööndile tüüpiliste lausteraliste setete esinemise vähesus või puudumine kogu Balti paleobasseini fatsiaalsel profiilil epikontinentaalses arengujärgus Kunda east Kukruse ea lõpuni. Veelkord, kas sagedased laia levikuga katkestuspinnad esindavadki kogu püsiva lainetuse madalikku ja see piirdub null-settimise vööndiga? Küsimused jäävad.

On, mille üle tõsiselt juurelda ja kaasaegse sapropeliitse merevetika kapseldumistingimusi eksperimentaalselt esile kutsudes, hõljuva peliitsaviga koosmattumist jälgides elu kestmist uurida.

Kuidas ette kujutada normaalmerelise elukeskkonna paljukordset ulatuslikku mahkjastumist ja taas „normaalmerestumist” nii laial alal, kus kukersiini ja savi segasette intensiivsema kuhjumise vöönd nihkus iga

järgneva tsükliga pisut avamere suunas? Biosfääri kaasaegsel geokraatlikul arenguetapil puuduvad penepaanistunud mandrite laiad madalad šelfimered, mis võimaldaksid analoogiaid appi võttes kaugel mineviku settimisruumi tõepärasemalt modelleerida.

Kõkkuvõtteks võime järeldada, et kukersiini massiliseks tekkeks oli kujunenud mitme olulise eelduse harvaesinev kokkulangemine: Baltika ürgmandri pikaajaline penepaanistunud seisund, selle asend lõunapöörjoonel, Balti paleobasseini avatus läände, võimaldades püsivate passaattuulte puhumise maa poolt ja ookeani süvahoovuse väljumise madalšelfile, samuti magevee mahukas, savi mõõdukas sissevool settimisruumi. Sellise äärmusliku faatsiesena esines kaldalähedane kukersiinmuda Balti paleobasseini kogu differentseerumis- ja stabiliseerumisaastal Kunda east Jaagarahu eani (Nestor, Einasto, 1997).

Märkimist väärib Balti paleobasseini ühe nõ maalähedasima vaigseveelise äärmus-faatsiese – peliitsavirikka kukersiinmuda – moodustumise lõpu üheaegsus teise maalähedasima vaigseveelise äärmus-faatsiese – aleuriitsavirikka *Eurypterus-dolosette* – settimise algusega Jaagarahu eal. Kulutusalaad nende äärmus-faatsieste tekke ajal olid oluliselt erinevad: ühelt poolt, kukersiin-faatsiese pikal tekkimisperioodil settimisruumist kaugel asuv stabiilses arengufaasis olev Timaani vana mägi, teiselt poolt, *Eurypterus-faatsiese* lühiajalisel kujunemisel basseini täitumisaastal alguses – oluliselt lähemal asuv noor Kaledoniidide mäestikuvöönd Baltika ja Laurentia (P-Ameerika) ürgmandri kokkupõrke kesk-ajal hilis-Siluris.

**Arengulooliselt kuulub III kukersiidi-kihind regressiivse maksimumina kindlalt lamava mesotsükli lõppu, karstumisjärgedega püstakulise kulutuspinna ülemisel piiril. Loomuliku stratigraafia kriteeriumide alusel soovitage Maidla kihistiku ülemine piir Eesti stratigraafilises skeemis nihutada Peetri kihistiku III kukersiidi-kihindi ülemisele, kestvatat lünka tähistavale piiri-kulutuspinna.*

VIIDATUD KIRJANDUS

- Aaloe, Aasa 1989. Kukersiidi geoloogilise uurimise ja kasutamise ajaloo. Teaduse ajaloo lehekülgi Eestist VII, Tallinn, Valgus, 25-42.
- Aaloe, Aasa; Bauert, Heiki, Soesoo, Alvar 2006. Kukersiit – eesti põlevkivi. GEOGuide Baltoscandia, Tallinn, 1-32.
- Bekker, Heinrich 1924. Kukruse lademe tekkimise tingimustest. Eesti Loodus, 7, 327-333.
- Einasto, Rein 1981 | Эйнасто, Р. 1981. Возрастные взаимоотношения стратотипических обнажений Яагараху, Пангамяги и Маази (средний венлок Эстонии) // Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised. Geoloogia 30 nr 3, 111-117
- Einasto, Rein 1995. „Liivi keele” omapärast Baltika arenguloos. Raam: Liivimaa Geoloogia (toim Tõnu Meidla jt), Tartu, 23-32.
- Einasto, Rein; Aat Sarv; Kalle Suuroja 2013. Laelatu ümbruse geoloogiline ehitus. Estonia Maritima 9, 5-14 ja 252-259.
- He, Tianchen; Zhu, Maoyan; Mills, Benjamin J. W.; Wynn, Peter M.; Zhuravlev, Andrey Yu.; Tostevin, Rosalie; Pogge von Strandmann, Philip A. E.; Yang, Aihua; Poulton, Simon W. & Shields, Graham A. 2019. Possible links between extreme oxygen perturbations and the Cambrian radiation of animals. (<https://www.nature.com/articles/s41561-019-0357-z>)
- Ivanova, Jelena Ivanovna 2006. | Ivnova, Jelena 2006. Globalnaja termohalinnaja paleotsirkuljatsija. Institut okeanologii, Nautšnõi mir, Moskva, 1-314 (vene k).
- Kõrts, Aile 1992. Ordovician oil shale of Estonia – origin and palaeoecological characteristics. Webby, Barry. D.; Laurie, John. R. (ed.). Global Perspectives on Ordovician Geology. Balkema, Rotterdam: 445-454.
- Kõrts, Aile & Einasto, Rein 1990. Kohtla and Maidla quarries. In: Kaljo; Nestor, 1990. Field meeting Estonia 1990. An Exkursion Guidebook. Tallinn, 145-148.
- Kõrts, Aile jt 1991 | Кыртс, Айле; Мянниль, Ральф; Пылма, Лембит; Эйнасто, Рейн. Этапы и обстановки накопления кукерситовой (водорослевой) органики в ордовике и силуре Эстонии // Важнейшие биотические события в истории Земли: Труды XXXIII сессии всеююзного палеонтологического общества – Tallinn, 1991, 87-94:
- Männil, Ralf, Bauert, Heiki & Puura, Väino 1986. | Мянниль Р., Бауерт Х., Пуура В. 1986. Закономерности распределения и накопления кукерситов. In: Пуура В. (ред.) Строение сланценой толщи Прибалтийского бассейна горючих сланцев-кукерситов. Валгус, Таллин, 48-54.
- Nestor, Heldur; Einasto, Rein 1997, Development of Ordovician and Silurian carbonate sedimentation basin // Geology and mineral resources of Estonia / Institute of Geology ; compiled and edited by Anto Raukas and Aada Teedumäe – Tallinn: Estonian Academy Publishers, 192-204; joon.
- Puura, Ivar 2007. Kes või mis on Gloeocapsomorpha? Eesti Loodus, 9,
- Põlma, L. 1972. | Пылма Л. 1972. Состав и количество детрита в отложениях северной фациальной зоны ордовика Прибалтики. Изв. АН ЭССР. Хим. Геол., 21, 4, 326-332.
- Põlma, L. 1982. | Пылма Л. 1982. Сравнительная литология карбонатных пород ордовика Северной и Средней Прибалтики. Валгус, Таллин, 1-152.
- Saadre, Tõnis & Suuroja, Kalle 1993. Distribution pattern of the beds of the Viivikonna Formation. Bulletin of the Geological Survey of Estonia, 3, 13-24.
- Suuroja, Kalle, Saadre, Tõnis; Kask, Jüri 1999. Geology of Osmussaar Island. Estonia Maritima 4, 39-63.
- Toom, Ursula 2019. Ordovician and Silurian Trace Fossils of Estonia. Taltech, 1-263.
- Zalasski, Mihhail 1917. | Залесский, М. 1917. О морском сапропелите силурийского возраста, образованном сине-зеленой водорослью. – Изв. Императорской АН 4: 3-18.

HOLOTSEENI MERETASEME MUUTUSED JA KIVIAJA KULTUURIPÄRAND NARVA-LUUGA KLINDILAHES

Alar Rosentau, Aivar Kriiska

Narva–Lauga (Luuga) klindilaht on tänapäeval valdavalt soine, mõnel pool ka liivane, ulatuslik rannikumadalik, mida lõunast ja idast piirab Balti klindiastrand. Aastatuhandeid tagasi laius klindilahas aga Litoriiinameri ning seal toimetasid kiviaja kütid-kalurid-korilased. Klindilahahe annavad nime kaks piirkonna suuremat jõge – Narva ja Lauga (Tammekann, 1940). Mõlema jõe sängide asukohad on muutunud vastavalt merevee tasemele, rannasetete kuhjumisele ja pärastjääaegsele maatõusule, mis oli kiirem klindilaha põhjaosas, ulatudes tänapäevalgi kuni 2 mm aastas (Kall *et al.*, 2021).

Hästi säilinud setteläbilõigetete ja rikkaliku kiviaegse arheoloogilise leiumaterjali tõttu on Narva-Lauga klindilaht olnud nii kvaternaargeoloogide kui ka arheoloogide huviorbiidis alates juba eelmise sajandi esimesest poolest. William Ramsay (1929) hinnangul ujutas Litoriiinameri klindilaha suures osas üle, ulatudes ligi 10 m tänasest rannajoonest kõrgemale. Mitmed hilisemad uurimused mereliste setete esinemise ja nende vanuste kohta on seda arusaama kinnitanud ja täpsustanud. Arheoloogilised uuringud algasid 1930. aastatel Richard Indreko eestvedamisel ning on jätkunud erineva intensiivsusega kuni tänaseni (uurimislugu vt Kriiska 1996; Kriiska *et al.*, 2016; Gerasimov *et al.* 2019). Käesolevas lühiartiklis esitatu toetub paljus ühele intensiivsemale uuringuperioodile aastatel 2008–2017, mille käigus arheoloogide ja geoloogide interdistsiplinaarses koostöös selgitati kiviaja asustuse seoseid loodusolude ja meretaseme muutustega.

Merevee taseme pikaajalises globaalses muutuses on viimase jääaja järel esinenud kaks suurt epohhi: kiire mereveetaseme tõusu periood (tõusu kiirus kuni 40 mm aastas) ja aeglustunud tõusu periood. Viimase algus on seotud suurte mandriliustike, eelkõige Põhja-Ameerika Laurentia ja Antarktika jääkilpide intensiivse sulamise lõppemisega (Lambeck *et al.*, 2014). Selle pöördelise sündmuse (sõrme)jäljed on hästi jälgitavad klindilaha setetes ja samuti arheoloogilises leiumaterjalis.

Kiire meretaseme tõusu perioodil ujutati Narva–Lauga klindilaht mere poolt üle ning setteläbilõigetes lasuvad varasemate paleomuldade ja turbakihtide peal merelised laguunimudad või liivad. Selliseid läbilõikeid võib näha Leekovasoo ja Tõrvajõe piirkonnas ning Lauga jõe kallastel. Kiire meretaseme tõusu tingimustes ujutati üle ka varasemad inimeste elu- ja toimepaigad Narva Joaorus, Tõrvalas ja Siivertsis (Indreko 1932; Rosentau 2013; Tõrv 2016). Neist paigust on avastatud kiviaegseid leide mere- ja jõesetete alt või seest. Narva Joaorus, mis on selle piirkonna vanim teadaolev kiviaja asulakoht, elasid inimesed esmakordselt u 8500 aastat tagasi.

Erinevatel absoluutkõrgustel paiknevate üleujutuskihtide analüüsil selgus, et eriti kiiresti, isegi üle 10 mm aastas, kerkis meretase klindilahes ligi u 7800–7600 aastat tagasi. Samasuguse järeltõusu jõudsid ka Lõuna-Rootsi ja Taani ranniku-uurijate tööühmades (Yu *et al.*, 2007). Kiire meretõusu põhjused ei ole senini hästi teada, kuigi üheks võimalikuks kandidaadiks on Laurentia jääkilbi viimase osa kiire sulamine, mis kergitas globaalset meretaset varasemast enam (Lambeck *et al.*, 2014).

Millal aga kiire tõusu periood lõppes? See sündmus on üsna hästi nähtav Narva–Lauga klindilaha setteläbilõigetes, kus transgressiivsed setteseeriad asenduvad regressiivsetega ehk teisisõnu kord mere poolt üleujutatud maismaa alad kuivasid taas. Selle fenomeni põhjus peitub piirkonna suhteliselt tagasihoidlikus maakerkes – kiire meretõusu tingimustes maismaa alad uppusid, meretaseme tõusu aeglustudes kerkis maa aga uuesti merest välja. Selliseid piirkondi ei ole Läänemere regioonis väga palju. Kiire maatõusuga aladel Läänemere põhjaosas on vaid regressiivsed setteseeriad ning nullilähedase maakerkega lõunaosas vaid transgressiivsed setteseeriad. Seega on just Narva–Lauga tüüpi piirkondades võimalik üsna hästi hinnata nende meretaseme epohhide ülemineku vanust. Meie klindilaha arenguloos markeerib seda üleminekut Litoriinamere rannamoodustiste vööndi kujunemine ja ulatuslike laguunide moodustumine. Transgressiivsete-regressiivsete setteläbilõigete analüüs ja koostatud meretaseme muutuste kõver näitavad, et see nihe (globaalselt siis suurte mandriliustike sulamise lõpp) toimus klindilahes ligi 7300 aastat tagasi (Rosentau *et al.*, 2013).

Sellel muutusel on oluline mõju ka kiviaja kultuuripärandi säilimisele ning mis eriti oluline, toonasele asustusloogikale. Kui varasemad kultuurikihid ja üksikleid on reeglina mattunud meresetete alla ning võivad seetõttu ka setteläbilõikes paremini säilida, siis nooremad leiukohad on sisuliselt

maapinnal ning olid nii avatud ajaloolisele inimtegevusele ja kergesti hävitatavad tänapäevase maakasutusega.

Litoriinamere laguunid – poolsaarte ja saartega piiratud merelahtede soidid, kuhu voolasid praegune Narva ja Lauga jõgi ning mitmed väiksemad jõed ja ojad, sobisid hästi kiviaja inimestele, pakkudes mitmekesist looduskeskkonda küttimiseks, kalapüügiks ja koriluseks. Teadaolevalt algas intensiivne inimasustus Narva–Lauga klindilahes kõigest sajandi jagu pärast Litoriinamere kõrgeimat veetaset. Piirkonnast tuntakse praeguseks u 30 asulakohta, mis kuuluvad sellesse varasesse ajajärku. Narva jõe alamjooksul tehtud uuringud on andnud niivõrd olulist teavet selle perioodi kohta, et vahemikku u 7500/7200 kuni 5900 aastat tagasi nimetakse Narva kultuuriks nii Eestis, Lätis, Leedus, Lääne-Venemaal kui ka Põhja-Valgevenes (Kriiska et al., 2017). Toona asustasid neid alasid sarnaseid savinõusid ning töö- ja tarberiistu valmistanud ja ka geneetiliselt lähedased inimrühmad.

Järgnevatel aastatuhandetel toimus aga kaks muutust, millega kaasnes senisest teissuguse materiaalse kultuuri esitõus ja vana jäljetu kadumine. Hiljemalt 5800 aastat tagasi jõudsid Narva–Lauga klindilahtede kammkeraamika kultuuri ja u 4800 aastat tagasi nn nöörikeramika kultuuri inimesed (Kriiska et al., 2016; Khrustaleva & Kriiska 2021). Mõlemal korral olid uusasukad senistest ka geneetiliselt erinevad (Saag et al., 2017). See võis tähendada isegi kogu rahvastiku „väljavahetamist“, senise elanikkonna väljatõrjumist või hävitamist.

Mõlemad ajajärgud on meie uurimisalal esindatud rohkete leiukohtadega – praeguseks tuntakse sealt u 40 kamm- ja enam kui 20 nöörikeramika kultuuri asulakohta. Kumbki neist kultuuridest ei ole ainuomane muidugi vaid Narva–Lauga „mikropiirkonnale“. Kammkeraamika kultuur hõlmas lisaks eelmainitud Narva kultuuri aladele veel Soomet, Karjalat Venemaal ja Põhja-Rootsit ning nöörikeramika kultuurid koguni suurema osa Euroopast. Kammkeraamika inimesed elatasid end küttimisest, kalapüügist ja korilusest, nöörikeramika kultuuri inimesed said aga märkimisväärse osa toidust looma- ja viljakasvatusest.

Narva ja kammkeraamika kultuuri ajajärgud on meie praeguse teema seisukohalt olulisemad. Erinevalt põllumeestest, rajasid nende kahe perioodi kütt-kalur-korilased oma elu- ja peatuspaigad vahetult laguunide randadele või neisse suubuvat jõgede kallastele. Rannasidusate asulakohtade puhul võib täheldada seaduspära, et mida suuremal absoluutkõrgusel, seda vanem asulakoht on, mis osutab, et inimesed on järgnenud rannajoonele. See teadmine aga on oluline kasutamaks

arheoloogilisi kohti mitte ainult inim-, vaid ka loodusajaloo uurimise allikana, luues läbi vastastikuse kasulikkuse just selle vajaliku põkkumise interdistsiplinaarseteks ühisuuringuteks.

VIIDATUD KIRJANDUS

- Ekman M. 2009. The Changing Level of the Baltic Sea during 300 Years: A Clue to Understanding the Earth. Summer Institute for Historical Geophysics. Åland.
- Gerasimov, D. V., Lisitsyn, S. N.; Kriiska, A. & Nordqvist, K. 2019 = Герасимов, Д. В., Лисицын, С. Н., Крийска, А., Нордквист, К. 2019. История исследований каменного века Нарвско-Лужского междуречья. Д.В. Герасимов. Памятники каменного века российской части Нарвско-Лужского междуречья. Санкт-Петербург, 19–26.
- Indreko, R. 1932. Kiviaja võrgujäänuste leid Narvas. Eesti Rahva Muuseumi aastaraamat VII: 1931, 48–67.
- Kall, T., Oja, T., Kruusla, K., Liibus, A. 2021. New 3D velocity model of Estonia from GNSS measurements. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2021, 70, 2, 107–125.
- Kriiska, A. 1996. Stone Age Settlements in the Lower Reaches of the Narva River, North-eastern Estonia. – Coastal Estonia: recent advances in environmental and cultural history. PACT, 51. Ed. by T. Hackens, S. Hicks & V. Lang. Rixensart, 359–369.
- Khrustaleva, I. & Kriiska, A. 2021. From a concentration of finds to Stone Age architecture: the Lommi III pit-house in northwestern Russia. *Documenta Praehistorica XLVIII*, 82–101.
- Kriiska, A., Gerasimov, D.V., Nordqvist, K., Lisitsyn, S.N., Sandel, S. & Kholkina, M.A. 2016. Stone Age Research in the Narva-Luga Klint Bay Area in 2005-2014. *Iskos* 11, 101–115.
- Kriiska, A., Oras, E., Lõugas, L., Meadows, J., Lucquin, A. & Craig, O. E. 2017. Late Mesolithic Narva stage on the territory of Estonia: pottery, settlement types and chronology. *Estonian Journal of Archaeology* 21(1), 1–35.
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y., Sambridge, M., 2014. sea Level and global ice volumes from the last glacial maximum to the Holocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 111, 1529615303.
- Ramsay, W. 1929. Niveauverschiebungen, eingestaute Seen und Rezession des Inlandeises in Estland. *Fennia* 52.
- Rosentau A., Muru M., Kriiska A., Subetto D., Vassiljev J., Hang T., Gerasimov D., Nordqvist K., Ludikova A., Lõugas L., Raig H., Kihno K., Aunap R., Letyka N. 2013. Stone Age settlement and Holocene shore displacement in the Narva-Luga Klint Bay area, eastern Gulf of Finland. *Boreas* 42(4), 912–931.
- Saag, L., Varul, L., Scheib, C. L., Stenderup, J., Allentoft, M. E., Saag, L., Pagani, L., Reidla, M., Tambets, K., Metspalu, E., Kriiska, A., Willerslev, E., Kivisild, T. & Metspalu, M. 2017. Extensive farming in Estonia started through a sex-biased migration from the Steppe. *Current Biology* 27(14), 2187–2193.
- Sander, L., Fruergaard, M., Koch, J., Johannessen, P.N., Pejrup, M., 2015. Sedimentary indications and absolute chronology of Holocene relative sea-level changes retrieved from coastal lagoon deposits on Samsø, Denmark. *Boreas* 44, 706–720.
- Tammekann, A. 1940. The Baltic Glint. A geomorphological study. Part 1. Morphography of the Glint. *Publicationes Instituti Universitatis Tartuensis Geographici* 24.
- Tõrv, M. 2016. Persistent Practices. A Multi-Disciplinary Study of Hunter-Gatherer Mortuary Remains from c. 6500–2600 cal. BC, Estonia. *Dissertationes archaeologiae Universitatis Tartuensis* 5. University of Tartu Press.
- Yu, S.-Y., Berglund, B. E., Sandgren, P. & Lambeck, K. 2007: Evidence for a rapid sea-level rise 7600 yr ago. *Geology* 35, 891–894.

KAEVANDAMISE MÕJU FAUNALE

Marko Mägi

Inimkonna üha suurenev energia- ja toorainete vajadus tingib praeguste kaevanduste laiendamist ja uute avamist. Kaevandamisega kaasnevad keskkonnamõjud on aga ulatuslikud ja sageli negatiivsemad, kui ette osatakse näha. Seepärast on kaevandusalade taastamine keeruline ja pikaajaline, puudutades kõiki toiduahela lülisid. Tänapäevaks teame, et Ida-Virumaal on põlevkivi kaevandamise tõttu piirkonna veerežiim muutunud ning sellele lisandunud saastatus soodustab sealsetes rabades mändide tavapärasemast jõudsamat kasvu, kuid sellel on negatiivsed tagajärjed rabakooslustele (Pensa *et al.*, 2004).

Kaevandamise mõjude kahanemist ei ole põhjust arvata, sest inimkonna energia ja ressursivajadusi arvestades võetakse aja jooksul kasutusse ühe enam uusi maardlaid, ka selliseid, mis asuvad kõrge keskkonnariskiga piirkondades. Näiteks 84% plaatina ja 70% koobalti varudest asuvad piirkondades, mille kaevandamisel on kõrged ökoloogilised riskid, kuid mitte ainult, ka kõrged sotsiaalsed riskid ja riiklikud huvid, mis võivad tekitada regionaalseid konflikte (Lèbre *et al.*, 2020).

Praeguste teadmiste kohaselt toodetakse USA-s aastani 2040 suur osa energiast valdavalt söest (Giam *et al.*, 2018). Seepärast on kaevandamisega kaasnevaid keskkonnamõjusid seadusandlikult reguleeritud ja vastavalt ka põhjalikult uuritud, kuid faunale on pööratud tähelepanu suhteliselt vähe – rõhk on suunatud saasteprobleemidele, sekundaarselt faunale. Tänapäevaks ei kahelda enam kaevandamisega kaasnevates negatiivsetes mõjudes vee-elustikule, kuid kvantitatiivseid hinnanguid faunas toimuvale napib, mistõttu ei ole teada, kas ja kuidas karmistunud regulatsioonid faunat mõjutavad. Kuigi USA-s kehtivad 1970ndatest puhta vee ja kaevandamisjärgse keskkonna taastamise regulatsioon, võib seniste uuringute põhjal võib öelda, et vaatamata regulatsioonidele väheneb söekaevanduse tõttu saastunud veekogudes kalade, salamandrite ja selgrootute arvukus ja taksonoomiline mitmekesisus (Giam *et al.*, 2018, Osenberg 2018), mis viitab senised juriidiliste regulatsioonide puudulikkusele. Kaevandamisega kaasnev veekeskkonna saastamine on viimastel kümnenditel tähelepanu all olnud, kehtestatud on rangemaid

piiranguid, kuid sajandi eest tööd alustanud kaevandused saastasid eelnevalt keskkonda piiranguteta. Kaevandusjäätide uhtumine jõgedesse oli tavapraktika. Nii on näiteks USA-s sajandi jooksul kulda kaevandades sajandi jooksul uhitud Whitewood Creek'i jõkke 100 miljonit tonni kaevandusjääke, mille tulemusel muutus kaevandusest allavoolu jõgi elutuks. Sarnaseid mõjusid on täheldatud mitmel pool, näiteks rauakaevanduse heidetega saastunud veekogudes väheneb oluliselt zooplanktoni koorumine (de Souza Santos *et al.*, 2021).

Inimmõjudest on kaevandamine, pean silmas eelkõige avatud kaevandusi, loomastikule ilmselt suurima mõjuga, sest senised elupaigad paratamatult kaovad lühemaks või pikemaks ajaks, või muutuvad oluliselt. Mitmed kaevandamisega kaasnevad mõjud on aga sekundaarsed ja sarnanevad teistele inimõjudele, näiteks teede ehitamisest, põllumajanduse arendamisest, raadamisest ja sellega kaasnevast elupaiga killustumisest tingitule, mistõttu võib lisaks konkreetset kaevandusmõjude uuringutes leitule, toetuda üldistamisel teatud määral ka teistes ökoloogia valdkondades leitud häiringutele.

Kaevandamise otsene mõju on eelkõige elupaiga kadumine, kaudsetena lisanduvad keskkonna saastumine (näiteks plii, arseeniga jmt), mis tekitavad loomadele akuutset või kroonilist stressi või kaevandamisega seotud taristuga seotu, nt lindude hukkumine elektriliinides või transpordi tulenevad mõjud. Sarnaselt üldisele teedevõrgu ehitusega kaasnevale negatiivsele mõjule on ka kaevandamisala teedevõrk loomadele negatiivse mõjuga, sest suurenenud liikluse tõttu hakkab loomi või muudab liiklus loomade käitumist. Kaevandamise järgselt jääb teedevõrk reeglina alles, lihtsustades inimeste jõudmist seni puutumata aladele, mis samuti häiringuid suurendab.

Avakaevanduse tõttu fauna hävimine on teatud mõttes paratamatu ja seda kompenseeritakse kaevealade loomastikule sobivaks muutmisega, kuid reeglina on see keeruline. Ilmselt oleks naiivne loota, et pärast kaevandamise lõppu taastub piirkond aja jooksul suksessiooni tõttu endiseks. Seepärast kasutatakse sageli piirkonna aktiivset taastamist, külvates või istudes piirkonda sobilikke taimi, mis aja möödudes loovad sobivad tingimused faunale.

Kuna kaevetöödega rikutakse senine mullakooslus, mistõttu ei ole kõik taimed võimelised kanda kinnitama, sest mullastik on oluliselt muutunud, mullakeemia samuti. Lisaks on looduslike taimede naasmine raskendatud, sest pinnases puuduvad taimede eluks vajalikud mikroseedid, kelle abil

taimed mullast toitaineid omastavad. Abiks on kunstlik mükoriisaseente lisamine kaevealadele, mida on edukalt tehtud ka Eesti karjäärade taastaimestamisel: koos mükoriisaseentega kasvanud taimestik on liigirikkam, kui seenteta kasvanu, lisaks soosivad seened taimede biomassi suurenemist, mis kiirendab mullateket ja seega järgmiste taimede arengut (Vahter et al., 2020). Mõnel juhul võivad karjäärides edukaks osutada võõrliigid, kuid nende kasutamisel on oht, et algselt kasvama hakanud võõrliik ei soosi kohalikku floora suksessiooni ja ei pruugi seega olla sobilik ka faunale. Näiteks kullakaevanduse taastamine kohaliku flooraga soosib kohaliku linnustikku märksa enam, kui võõrtaimedega taastamine (Werema 2021 ja sealsed viited).

Asukohast ja kavandamise viisist sõltub taastaimestumine ja vastavalt ka linnustik. Kuna linnud on teistest selgroogsetest oluliselt liikuvamad, peetakse lindude arvukust üheks esmaseks taastamise edukust iseloomustavaks parameeteriks. Kuid arvukus üksi ei ole hea näitaja, sest linnukooslus võib varasemast oluliselt erineda, kuna eelise saavad eelkõige avamaastiku liigid või ka veelinnud, kui kaevandusjärgselt tekib piirkonda veekogusid või märgalasid, piirkonda võivad aga vältida metsalinnud. Austraalia boksiidikaevanduste linnustik võib taastaimestamisel ümbruskonnaga sarnasele tasemele taastuda 4–5 aastaga. Linnustiku taastumisel on oluline piirkonna sidusus ümbritsevate elupaikadega. Kui piirkond on näiteks ümbritsetud metsaga, taastub esimestel aastatel linnustik kiiresti, võib seejärel jõuda ümbritsevate elupaikade linnustikuga samale tasemele, kuid sageli kasvab lindude arvukuse siiski aegamööda ja ei pruugi ka aastakümneid hiljem jõuda samale tasemele, kui on seda loodusmaastikus. Kuna linnustik sõltub taastamisel kasutatud taimestikust, ollakse seisukohal, et taimestiku areng, selle koostis ja struktuur, millest sõltub elupaiga taastumine – toidutaimed, õõnsused, võrastiku areng, kõdupuit jne – määravad suuresti ka linnukoosluse. Oluline on seejuures ka taimestiku sarnasus ümbritseva maastikuga, mis soodustab konkreetsete liikide jõudmist taastealale – sobiva koosluse olemasolul võib lindude arvukus ja kooslus üsna kiiresti sarnaneda ümbritseva häirimata alade linnustikule.

Metsalindude naasmine taastealadele on mõnevõrra problemaatiline ja aeganõudev, sest puude kasvamine võtab aega. Lahenduseks ei pruugi olla metsa istutamine, sest linnud võivad eelistada looduslikult taastunu metsa. Näiteks Tšehhi pruunsöe kaevanduste taasmetsastunud aladel eelistab raudkull (*Accipiter nisus*) just looduslikult kasvanud kaasikuid,

mitte aga istutatuid (Šálek et al., 2010). Eelkõige seepärast, et looduslikult taastunud alal on maastik mosaiiksem, on rohkem avatust ja ökotone, mille mitmekesisem taimestik soosib raudkulli saakliikide – pisivärvuliste – elu. Kirde-Inglismaal on aga 25–30 aastased võsastunud niisked kaevandusalad põhjatihaste (*Poecile montanus*) oluline elupaik, sest mujalt on sellised elupaigad kadunud või oluliselt degradeerunud (Broughton et al., 2020).

Kassikakk (*Bubo bubo*), kes on piirkonniti Euroopas ohustatud liik (ka Eestis), pesitseb Euroopas meelsasti kaevandamise tagajärjel tekkinud vertikaalpindade eenditel, sarnaseid kohti kasutavad ka mitmed teised ohustatud linnuliigid. Hispaanias asustab kassikakk 64% liigile sobilikest kaevandustest, kuid kartus, et kassikakk teistele ohustatud lindudele konkurent on, ei ole tõeks osutunud, sest kassikakk toitub valdavalt küülikutest ja seega ei kujuta kaevandusjärgne võimalik kassikaku arvukuse tõus märkimisväärset ohtu, pigem võib kaevanduspiirkondadel näha kassikakule positiivset mõju (Rohrer et al., 2021). Ka vertikaalseintesse pesaõõnsusi rajavaid linde võib kaevandus soosida. Näiteks on Hispaanias karjäärides kaldapääsuke (Riparia riparia) rohkem, kui seda võiks eeldada ning urge kaevates loovad nad pesitsusvõimalusi ka teistele sekundaarsetele suluspesitsejatele (kalju-, kodu-, põldvarblane, mustlepalind ja kivikakk; Rohrer et al., 2020). Ka Eestis kohtab karjäärides kaldapääsukeste seltsinguid: 76% liigi kolooniatest asuvad inimtekkelistes elupaikadest, milleks on peamiselt liiva- ja kruusakarjäärid, vaid 24% looduslikest elupaikadest (Keerberg ja Marja 2020). Karjääride suurt osatähtsust võib selgitada see, et karjäärist on linde lihtsam leida – need on ligipääsetavamad, kuid siiski võib arvata, et inimtekkelised elupaigad on Eesti kaldapääsuke populatsiooni elujõulisuse seisukohalt olulised ning mõjutavad positiivselt ka liigi koguavukust.

Hiljutine Eesti kaevandusalade linnustiku seire sedastas, et inimõju ja häiringute vähendamine, tehiseveekogude säilitamine ja metsamajandamise minimeerimine on võtmetegurid mitmekesise linnustiku taastumiseks põlevkivi kaevandamiskohtades (Paal 2022). Aidu karjääri taasmetsastatud alade linnustik sarnaneb juba väljakujunenud metsa linnustikule, lindude asustustihedus on siiski kõrgeim üle 40-aastase puistuga aladel. Narva karjääri tehistiigid on aga soodsad pesitsuskohad märgalade lindudele; enim on linde 20–40 aastastes puistutes, märksa vähem lagedatel puistealadel (mõlemas karjääris); röövlindude arvukus on aga karjäärides väga madal (Paal 2022).

Mõned linnuliigid, näiteks väiketüll (*Charadrius dubius*), võibki pigem

kohata inimtekkelistes elupaikades, liiva- ja kruusakarjäärides (Aua 2013), kuid liik taandub, kui karjääris hakkab taimestik võimust võtma. Kamariku karjääris pesitsevate kahvajate inventuuri käigus registreeriti 25-l hektaril kokku 34 linnupaari, neist 16 olid väiketüllid (Aua ja Salumäe 2010). 2012. aasta seisuga oli Eesti karjääridest leitud pesitsemas 36 liiki veelinde, liigirikkamad olid Kamariku, Lasila ja Karinu karjäärid, esmakordselt tuvastati karjäärides pesitsemas luitsnokk-part (*Anas clypeata*) ja hüüp (*Botaurus stellaris*) (Pehlak et al., 2014).

Vanad karjäärid on soodne elupaik mitmetele kahepaiksetele ja roomajatele. Näiteks on kõred (*Bufo calamita*) Euroopas üha rohkem asustanud töö lõpetanud karjääre, sest looduslikud elupaigad on kadumas või hävinud (Rannap 2017). Sama on juhtunud ka Eestis, kus enamik kõre asurkondi on liivakarjäärides. Kõred on koondunud karjääridesse, sest metsastatud luitealadel on need ainsad säilinud avatud elupaigalaigud. Kuid silmas tuleb pidada, et kõred asustavad vaid rekultiveerimata karjääre, taastaimestumine, ka loomuliku suktsessiooni tõttu, ei sobi kõrele, kaitsealuse liigina tuleks karjääris taastamistööd kõre tõttu peatada. Kõre kuulub karjääride pioneerliikide hulka, kaevudes vajadusel talvituma lausa kolme meetri sügavusele. Ka Eestis kaitse all olev kivisisalik (*Lacerta agilis*) on liivaste elupaikade liik ja liivakarjääride rajamine võib asurkonda ohustada. Samas võivad vanad taastaimestuvad liivakarjäärid liigile sobilikud olla, kuid liigne taimestiku vohamine liigile siiski ei sobi.

Karjääride putukafaunast võivad kaevandusala asustada kiletiivalised, kes on kohastunud lagedate elupaikadega, näiteks liivikutega. Tšehhi pruunsöe kaevanduste taastealade kiletiivalistest on teada, et looduslikult taastuma jäänud aladel oli kaks korda rohkem haruldasi liike, arvukuselt neli korda rohkem, kui aktiivelt taastatud aladel ning regionaalselt kadunud liike leiti ainult looduslikult taastunud aladelt. Autorid järeldavad, et kiletiivaliste vajadusi silmas pidades tuleb taastamisel järgida elupaiga mosaiiksust ja suktsessiooni mitmekesisust (Hendrychová ja Bogusch 2016). Tšehhi kaevandustes tekkinud tiikidest on aga leitud 40 kiilliliiki, neist 14 riiklikku punase nimestiku liiki, mis näitab, et tiigid on elustikurikkad (Harabiš 2016). Kuid kiilide vaatenurgast vaadatuna on selliste tiikide kvaliteet kõikuv, sõltudes tiigi põhjast, mis määrab suuresti taimestiku – kiilidele sobivaim oleks tiigipõhi, mis ei soosi taimede vohamist, mis viib tiigi kinnikasvamiseni.

Imetajate naasmist taastatud aladele on uuritud suhteliselt vähe, kuid senise põhjal nähtub, et taastamine mõjutab imetajafauna taastumist vähe,

pigem sõltub naasmine imetajate funktsionaalsest kuuluvusest, pinnasest, liigi kehakaalust ja teistest invasiivsetest liikidest: pinnases elavad ja/või kulgevad ja herbivoorsed liigid naasevad kaevandamise lõppedes kiiresti, kuid hiljem nende arvukus langeb; maapinnal kulgevate, kiskjate ja omnivooride arvukus taastub paari esimese aastaga, kuid võib seejärel samuti langeda (Lawer *et al.*, 2019). Suurimetajate elule on kaevandamise otsene mõju väike, sest isendid suudavad piirkonnast lahkuda. See suurendab aga konkurentsi ja asustustihedust ümberkaudsetel aladel, mis võib asurkonnale negatiivselt mõjuda (toidukonkurents, parasiidid ja haigused).

Kui kaevandamine muudab jäädavalt ökosüsteemi ja selle pikaajalised ja kumulatiivsed mõjud ja taastamise puudulikkus muudavad püsivat elusloodust, peaks hoolega vaagima kaevandamislubade väljastamist. Loomastiku taastumist kiirendab, kui ei väljastata lube piirkondadesse, mis ei ole taastatud või taastunud; ei väljastada uusi lube ettevõtetele, kes ei ole seniseid nõudeid täitnud; kui peatada edasine maade kasutamine, kuni taastunud on vähemalt 50% senistest aladest; mitte piirduda taastamise hindamisel esteetiliste kriteeriumite, vaid sisulise kontrolliga.

VIIDATUD KIRJANDUS

- Aua J (2013). Väiketüllide (*Charadrius dubius*) märgistamine eestis aastail 2010–2012. *Hirundo* 26: 51-52 https://www.eoy.ee/hirundo/file_download/11/Aua_26_1.pdf
- Aua J, Salumäe M (2010). Kamariku karjääri linnustikust. *Hirundo* 23: 73-74 https://www.eoy.ee/hirundo/file_download/13/Aua_Salumae_23_2.pdf

Broughton RK, Parry W, Maziarz M (2020). Wilding of a post-industrial site provides a habitat refuge for an endangered woodland songbird, the British Willow Tit *Poecile montanus kleinschmidti*. *Bird Study* 67: 269-278, DOI: 10.1080/00063657.2020.1863333

de Souza Santos G, Silva EEC, Balmant FM, et al., (2021). Impacts of exposure to mine tailings on zooplankton hatching from a resting egg bank. *Aquatic Ecology* 55: 545-557, <https://doi.org/10.1007/s10452-021-09844-7>

Giam X, Olden JD, Simberloff D (2018). Impact of coal mining on stream biodiversity in the US and its regulatory implications. *Nature Sustainability* 1: 176-183, <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0048-6>

Harabiš F (2016). High diversity of odonates in post-mining areas: Meta-analysis uncovers potential pitfalls associated with the formation and management of valuable habitats. *Ecological Engineering* 90: 438-446, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.070>

Hendrychová M, Bogusch P (2016). Combination of reclaimed and unreclaimed sites is the best practice for protection of aculeate Hymenoptera species on brown coal spoil heaps. *Journal of Insect Conservation* 20: 807-820 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10841-016-9912-8>

Keerberg L, Marja R (2020). Kaldapääsukese (*Riparia riparia*) leviku, haudeseltingute suuruse, pesarüüste ja elupaigakasutuse ülevaade 2017. aasta andmetel Eestis. *Hirundo* 33: 16-29. <https://www.eoy.ee/hirundo/files/Keerberg-Marja-2020.pdf>

Lawer EA, Mupepele AC, Klein AM (2019). Responses of small mammals to land restoration after mining. *Landscape Ecology* 34: 473-485, <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00785-z>

Lèbre É, Stringer M, Svobodova K, et al., (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications* 11: 4823, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>

Osenberg CW (2018). No clean coal for stream animals. *Nature Sustainability* 1: 160-161 <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0049-5>

Paal U (2022). Aidu ja Narva korrastatud põlevkivikärjääride linnustik 2020. aastal. *Hirundo* 35: 28-44. <https://www.eoy.ee/hirundo/files/Paal-2022.pdf>

Pehlak H, Aua J, Aaslaid L, Salumäe M (2014). Veelindude inventuur Eesti kärjäärides 2012. aastal. *Hirundo* 27: 1-8 https://www.eoy.ee/hirundo/file_download/383/Pehlak.2014.v27.pdf

Pensa M, Liblik V, Jalkanen R (2004). Temporal Changes in the State of a Pine Stand in a Bog Affected by Air Pollution in Northeast Estonia. *Water, Air, & Soil Pollution* 159: 87-99, <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000049191.36830.a7>

Rannap R (2017). Kõre (*Bufo calamita*) kaitse tegevuskava. <https://keskkonnaamet.ee/media/701/download>

Rohrer Z, Rebollo S, Andivia E, et al., (2020). Bird services applicable to mine restoration: a case study of Sand Martin (*Riparia riparia*) burrow construction. *Journal of Ornithology* 161: 243-255, <https://doi.org/10.1007/s10336-019-01711-5>

Rohrer Z, Rebollo S, Monteagudo N, Talabante C (2020). Eagle Owl presence and diet at mining sites: implications for restoration and management for cliff-nesting birds. *Restoration Ecology* 28: 1541-1550, <https://doi.org/10.1111/rec.13256>

Šálek M, Hendrychová M, Rehoř M (2010). Breeding habitat of sparrowhawks, *Accipiter nisus* on spoil heaps after coal mining. *Acta Oecologica* 36: 197-201, <https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.12.006>

Vahter T, Bueno CG, Davison J, et al., (2020). Co-introduction of native mycorrhizal fungi and plant seeds accelerates restoration of post-mining landscapes. *Journal of Applied Ecology* 57: 1741- 1751, <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13663>

Werema C (2021). Does the use of exotic and native tree species in rehabilitation attract birds equally? The case of Golden Pride Gold Mine, Tanzania. *African Journal of Ecology* 59: 641-654, <https://doi.org/10.1111/aje.12871>

JÄLGELEMENDID ULJASTE SULFIIDSE MINERALISATSIOONI ILMINGUTES

Rasmus Kont

Minu magistritöö „Jälgelemendid Uljaste sulfidse mineralisatsiooni ilmingutes“ on osa ResTa projektist „Potentsiaalselt kasulikud komponendid ja maagistumise genees Eelkambriumi kivimite polümetalse maagistumise ilmingutes“. Projekti peamiseks eesmärgiks on selgitada sulfidse maagistumisega seotud polümetallide leviku seaduspärasusi ja maagistumise võimalikku geneesi Eestis levivates kivimites. Eesti kristalse aluskorra maavarade perspektiivi on hakatud taas uurima alates 2018. aastast Eesti Geoloogiateenistuse poolt. Suuremas huviorbiidis on Sonda-Uljaste piirkond, kus juba varasemate uuringute käigus on tuvastatud anomaalselt kõrgeid Zn, Cu ja Pb sisaldusi.

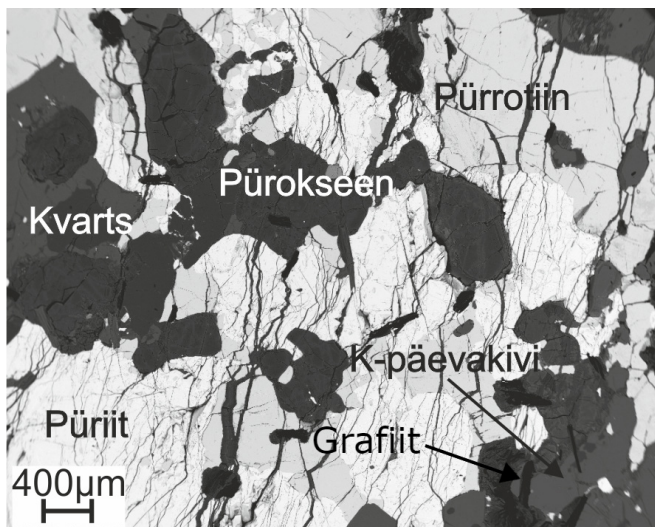
Eesti aluskorras on kõige märkimisväärsemad sulfidse ja polümetalse maagistumise ilmingud seotud Alutaguse, Tallinna ja Jõhvi vöönditega. Praeguse uurituse juures asub suurim perspektiiv Eesti aluskorras metallide leidmiseks Kirde-Eesti piirkonnas (sealhulgas Sonda ja Uljaste aladel). Sulfidse maagistumise ilmingud Eesti aluskorras on valdavalt seotud sulfide ja grafiiti sisaldavate grafiitgneissidega, mida on varasemas kirjanduses kutsutud ka „mustadeks kiltadeks“, kuid siinkohal tuleb mainida, et korrektsuse huvides ei tasuks neid segamini ajada meie aluspõhjas leiduva sette kivimi graptoliitargilliidiga. Eesti kristalses aluskorras levivad grafiitgneisid Saue-Väraska joonest kirde poole jääval alal, olles valdavalt Tallinna ja Alutaguse vööndi piirides. Leiuala laieneb ida suunas Pihkva ja Leningradi oblastini ning põhja suunas Lõuna-Soomeni. (Petersell et al., 1991)

Öpiku (1942), Luha (1946) ja Peterselli (1991) keemiliste-, mineraloogiliste- ning dateerimisandmete alusel moodustavad Eesti aluskorra kivimid jätku Kesk-Rootsis ja Lõuna-Soomes levivatele struktuuridele ja kivimitele. Ka enamuse Soome Paleoproterosoikumiaegsetest väärismetallide leiukohtadest on orogeenset päritolu ning seotud just Svekofennia orogeneesiga. Seega võiks teoreetiliselt sarnaselt Rootsile ja Soomele ka Eesti aluskorrast leida metallide (nt raua, nikli, koobalti, tsingi, plii, vase ja väärismetallide nagu kulla või hõbeda)

kõrgenenud sisaldusi. Siinkohal ei tohiks unustada, et meie aluskorra kivimid, erinevalt Soomest või Rootsist, asuvad kuni mitmesaja meetri paksuse settekivimite kihi all, mis muudab nii uuringud kui ka tulevikus planeeritava kaevandamise kordades keerulisemaks ja kulukamaks.

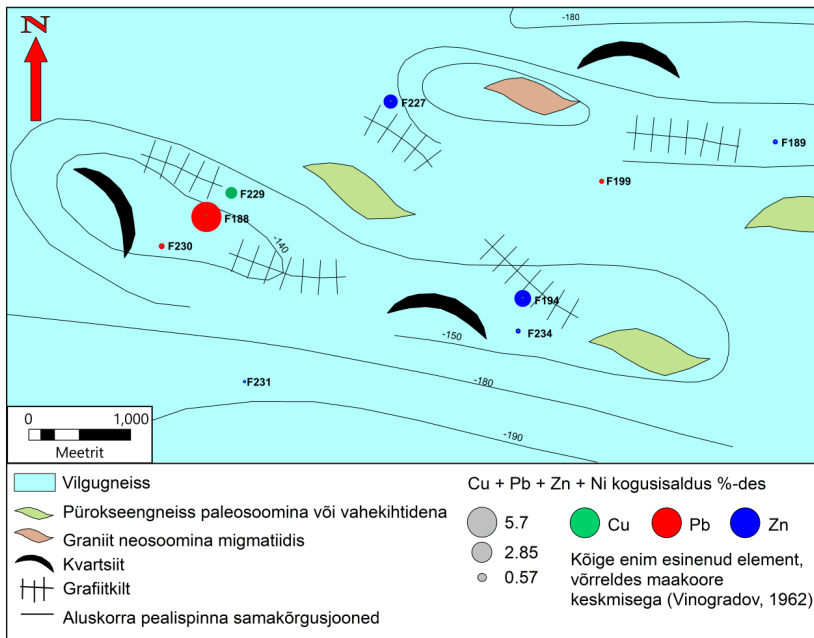
Tulles nüüd konkreetsemalt Alutaguse vööndi ja sealsete grafiitgneisside juurde, siis esindavad antud kivimid amfiboliitse faatsiese järk-järgulist üleminekut granuliitsesse faatsiesse. Selle alusel saab väita, et Alutaguse vööndi kivimite maksimaalne moondeaegne temperatuur ja rõhk jäid 600–800 °C ning 3–6 kbar vahele (Klein, 1986). Varasemate uuringute alusel kuuluvad Alutaguse vööndi kivimid Kirde-Eesti kalkofiilsesse piirkonda, mida iseloomustab Ca, P, Ba, Sr defitsiit ja Si, K ja kalkofiilsete elementide nagu S, Zn, Pb, Cu, Mo ja Ag rikastumine (Koppelmaa, 2002). Vööndi grafiitgneissid on peene- kuni keskmiseteralised, kildalise tekstuuriga ning värvuselt mustad kuni tumehallid. Grafiitgneissidele on iseloomulik kõrgendatud grafiidi ja sulfidsete maakmineraalide nagu pürroitiini, püriidi, sfaleriidi, galeniidi, kalkopüriidi ja molübdeniidi sisaldused, kogusisaldused jäävad valdavalt 10-15% vahele (Koppelmaa, 2002). Lisaks sulfididele on tavalised ka maakmineraalid nagu magnetiit ja hematit ning aktessorsetest mineraalidest on esindatud tsirkoon, apatiit ja monatsiit (Koppelmaa, 2002).

Polümetalset maagistumist Uljaste piirkonna grafiitgneissides



Joonis 1. Pürroitiini ja püriidi vaheldumine grafiitgneisis puursüdamik F188.

iseloomustab peamiselt kõrgenenud sisaldustega sidero- ja kalkofiilsete rauaga seotud mineraalide esinemine, peamiselt pürrotiini ja püriidi vaheldumine (Joonis 1), aga esineb ka sfaleriiti, kalkopüriiti ja galeniiti. Mineraalidest leidub ka molübdeniiti ja kaltsiiti, harvem turmaliini ja barüüti. Pürrotiini ja sfaleriidi kristallid ja kihid on tihtipeale subparalleelsed kivimi üldise gneisilise tekstuuriga. Pürrotiini terad võivad olla ümardunud ning sisaldada kalkopüriidi ja sfaleriidi suletisi. Uljaste ala grafiitgneisside väävli ja grafiidi sisaldused on väga varieeruvad vaheldudes 0.62–10.02% ja 5–15% vahel vastavalt. Rauasulfiidide kogusisaldused võivad kohati ulatuda kuni 39%-ni. Puuraugus F188, kust on kõige enam polümetalle leitud, ulatuvad Zn, Cu ja Pb kogusisaldused kuni 5.6%-ni (Joonis 2) ühe meetrise intervalli kohta. Uljaste piirkonna polümetallide sisaldused ületavad maakoore keskmisi sisaldusi (Vinogradov, 1962) kuni seitsme kordselt. Samuti on märgata kekmisest kõrgemaid U sisaldusi, mis esineb valdavalt uraniidi näol. Tüüpiliselt on grafiitgneissides esinev pürrotiin Ni, Co, Cu ja Zn rikas, kuid Cr ja Pb poolest vaene. Lisaks on grafiitgneissides täheldatud üksikuid anomaalselt kõrgeid Ag (4.3 mg/kg), Cd (26 mg/kg), Mo (24 mg/



Joonis 2. Polümetalse maagistumise levik Sonda-Uljaste alal. Aluskorra andmed: Maaamet. Elementide sisalduste spektraalandmestik: Petersell et al., 1991.

kg) ja Se (12 mg/kg) sisaldusi. Au puhul on sisaldused enamjaolt madalad (0.002 kuni 0.008 mg/kg), kuid üksikutes proovides ulatuvad maksimaalsed sisaldused 0.6–1 mg/kg kohta. (Petersell et al., 1991).

Uljaste piirkonna grafiitgneisid ega nendega seotud sulfiidide teke ei ole seotud ainult ühe geoloogilise sündmusega. Süngeneetilist pürroitiini ja püriiti lõikavad hilisemad sekundaarsete protsessidega tekkinud sfaleriidi, kalkopüriidi ja galeniidi sooned viitavad sellele, et Uljaste polümetalne maagistumine on seotud vähemalt kahe erineva etapiga (Petersell et al., 1991; Vaher et al., 1964). Esimese etapi maagistumine on enamasti seotud grafiitgneissidega ja ultraaluseliste metavulkaniitidega, millele on omased kõrgemad Cr, Ni, Co ja Cu sisaldused ning mis viitavad süvarikete olemasolule. Grafiitgneisside mikroelementide suhtvahekorrad viitavad sellele, et ilmselt oli algselt tegemistsüvaveeliste setetega. Mustades kiltades laialdaselt leviva pürroitiini kõrgete Ni, Co ja Cu sisalduste ja S isotoopandmed ($\delta^{34}\text{S}$ -5 kuni 7‰) viitavad, et grafiitgneisside teke on seotud mere põhja süvarikete vööndite läheduses oleva enamasti hüdrotermaalse ja vulkaanilise tegevusega, aga ka mudarikaste setete settimisega. Teise, oluliselt väiksemamahulise etapi hilisemat iseloomu selgitab sfaleriidi, galeniidi, kalkopüriidi või neid mineraale sisaldavate karbonaatsete mineraalide esinemine kivimit lõikuvate soontena bretšastunud intervallides. Sekundaarsele etapile on iseloomulikud kivimites selgesti määratletavad lõhed või kavernid (Vaher et al., 1964). Ka teine etapp on tõenäoliselt süvapäritolu, millele viitab sulfiidide lõikuv iseloom plagiomikrokliingraniitides. Polümetalne maagistumine esineb ka Uljaste piirkonna Ordoviitsiumi lubjakivides, kus arvatakse, et tegemist võib olla Kaledoniidide mäetekke lõppfaasiga seotud hüdrotermaalsete protsessidega (Vaher et al., 1964), millele võivad viidata Uljaste ala aluskorra ja aluspõhja karbonaatsete kivimite $\delta^{13}\text{C}$ väärtused (-9.5‰ ja -12.2‰ vastavalt), mis on märkimisväärselt sarnased. (Petersell et al., 1991)

Lisaks mineralisatsiooni ilmingute kirjeldamisele tegeleti ka mineralisatsioonisündmuste dateerimisega. Mineraalide assotsiatsioonide uurimise käigus leiti grafiitgneissidest uraniniidi teri, mida on võimalik kasutada keemiliseks dateerimiseks. Elektronmikroskoopi kasutades määrati uraani ja plii sisaldused ning nende omavaheline suhe, mille abil saab määrata hüdrotermaalsete sündmuste ja erinevate metallide ümberjaotumise ajalugu uuritavates kivimites. Uljaste puuraugust F188 tuvastati kokku 48 uraniniidi tera, mille alusel saab väita, et uraniniidi arvutuslik vanus jääb valdavalt vahemikku 1558–1858 ± 40 Ma ning

statistiliselt kõige esinduslikum vanusegrupp jääb vahemikku 1708–1783 ± 40 Ma. Saadud vanused viitavad sellele, et analüüsitud uraniniidiproovid on tekkinud Svekofenni orogeneesi lõppfaasi moondeprotsesside ja postorogeennsete sündmuste (blokiliste liikumiste) alguses/üleminekul. Sest just 1,830–1,630 Ga tagasi toimus Svekofenni orogeneesi lõppfaasi ja sellele järgnenud magmatism, mis on seotud litsofääri/vahevöö ülaosast pärist aluselise kuni happelise magmatismiga ning riftistumise ja orogeense kollapsiga (Soesoo ja Hade, 2012).

VIIDATUD KIRJANDUS

- Koppelmaa, H., (2002). Eesti kristalse aluskorra geoloogiline kaart mõõtkava 1:400 000 seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus, 1–32.
- Klein, V.M., (1986). Metamorphic complex of the Svecofennian Belt in Northern Estonia: PhD (Cand. of Geol.-Min.) thesis. Tallinn: Acad. Sci., Estonian SSR. (vene keeles)
- Luha, A., (1946). Earth resources in ESSR. Concluding overview of geological appliances. Tartu: Teaduslik Kirjandus, 1–176. (vene keeles)
- Petersell, V., Kivisilla, J., Pukkonen, E., Pöldvere, A., Täht, K., (1991). Maagistumise ja mineraalustumise ilmingud Eesti sette- ja kristalse aluskorra kivimites. EGF 4523. (vene keeles)
- Soesoo, A., Hade, S., (2012). Geochemistry and age of some A-type granitoid rocks of Estonia. LITHOSPHERE 2012 – Symposium. Espoo, Finland, 97–101.
- Vaher, R., Puura, V., Erisalu, E., (1962). Tectonics of North-Eastern Estonia. Tallinn: ENSV TA GI, 319–336. (vene keeles)
- Vaher, R., Kuuspalu, T., Puura, V., Erisalu, E., (1964). Setting of sulphide ore occurrences in the Uljaste area. (Ed.), Baukov, S.S. Lithology of Paleozoic Deposits in Estonia. Tallinn: ENSV TA GI, 33–53. (vene keeles)
- Vinogradov, A.P., (1962). Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the Earth's crust. Geochemistry, 7, 641–664.
- Öpik, A., (1942). Über Magnetometrie und die Geologie des Urgebirges von Estland. Tartu: Tartu University. Manuscript. (saksa keeles)

Geoloogia sügiskool toimub Tartu Ülikooli ökoloogia- ja maateaduste doktorikooli abil ASTRA projekti “Per Aspera” toel.



Euroopa Liit
Euroopa
Regionaalarengu Fond



Eesti
tuleviku heaks