

GEOLOGIA SIIS JA PRAEGU

XX Geoloogia Sügiskool



Tartu Ülikooli Ökoloogia ja maateaduste instituut
Tartu Ülikooli Geoloogia osakond
Geoteaduste Üliõpilaste Selts

Geoloogia siis ja praegu

Schola Geologica XX

Tartu 2024

Autoriõigused: autorid, toimetajad

Toimetajad: Eelika Kiil, Triinu Jairus

Kaane illustratsioon: Imre Andreas Martin

Küljendus, kujundus: Triinu Jairus, Eelika Kiil

Soovitav viitamise vorm:

Kogu väljaandele:

Kiil, E., Jairus, T. (toim.) 2024. Geoloogia siis ja praegu. Schola Geologica XX. Tartu, 39 lk.

Artiklile:

Ani, T., 2024. Geoloogilise kaardistamise tulevikust 3D suunaga
Rmt.: Kiil, E., Jairus, T. (toim.) Geoloogia siis ja praegu, Schola Geologica XX.
Tartu, lk 9.

Kahekümnenda Geoloogia Sügiskooli toimumist ning seotud teadusettekanete sarja „Schola Geologica” toetasid Tartu Ülikooli Ökoloogia- ja maateaduste instituut, Tartu Ülikooli Geoloogia osakond, Geoteaduste Üliõpilaste Selts ja Eesti Teadusagentuur.

ISSN 2674-3450



SISUKORD

AJAKAVA	5
EESSÕNA	7
GEOLOOGILISE KAARDISTAMISE TULEVIKUST 3D SUUNAGA	9
<i>Tavo Ani</i>	
METEORIITIKA LÜHIAJALUGU	10
<i>Jüri Plado</i>	
ARHEOMETALLURGIAST JA RAUASULATAMISEST	22
<i>Kristo Oks</i>	
GEOLOOGIA ROLL EILE, TÄNA JA HOMME	24
<i>Erik Puura</i>	
STRATIGRAAFIAST SIIS JA PRAEGU	27
<i>Olle Hints</i>	
MEREVEE TASEME JA RANNAJOONE PÄRASTJÄÄAEGSETE MUUTUSTE UURINGUTEST LÄÄNEMERE IDAOSAS	33
<i>Alar Rosentau</i>	
EESTI GEOLOOGIATEENISTUS KUI GEOLOOGILISTE ANDMETE SÄILITAJANA	38
<i>Ants Vain</i>	

AJAKAVA

GEOLOOGIA SIIS JA PRAEGU

XX Geoloogia Sügiskool
Taevaskoja Turismi- ja Puhkekeskus

11. oktoober

14.00 LÕUNA

15.00 AVASÕNA ja ETTEKANDED

Erik Puura – Geoloogia roll eile, täna ja homme

Tarmo All – Kas tuumaenergia on alternatiiv: 13 aastat hiljem!

Denis Pavlov – Lahinguruumi luurealane ettevalmistus

16.15 VIRGUTUSPAUS

16.30 ETTEKANDED

Andres Reimann – Teaduse populariseerimine

Alar Rosentau – Merevee taseme ja rannajoone pärastjääaegsete muutuste uuringutest Läänemere idaosas

Alvar Soesoo – Geoloogia ühiskondlike formatsioonide tu(u)les

18.00 ÕHTUSÖÖK

19.30 ÕHTUNE PROGRAMM

Eduard Pukkonen – Praktikumidest siis: Kamtšatka

Richard Pihel – Praktikumidest praegu: Jordaania

12. oktoober

08.30 HOMMIKUSÖÖK

9.30 ETTEKANDED

Olavi Tammemäe – Kuidas sobituvad kokku rohepööre, energeetika ja riigikaitse

Tavo Ani – Geoloogilise kaardistamise tulevikust 3D suunaga

Jüri Plado – Meteoriiitika lühiajalugu

Olle Hints – Stratigraafiast siis ja praegu

11.30 VIRGUTUSPAUS

12.00 ETTEKANDED

Raul Paat – Soode olukorrast Eestis

Ants Vain – Eesti Geoloogiateenistus geoloogiliste andmete säilitajana

Johannes Vind – Eesti fosforiidiuuringute minevik ja olevik

14.00 LÕUNA

15.00 MODEREERITUD ARUTELU

16.00 TAEVASKOJA GEOMÄNGUD

18.00 ÕHTUSÖÖK

19.30 ÕHTUNE PROGRAMM JA SAUN

13. oktoober

8.30 HOMMIKUSÖÖK

9.30 VIRGUTUS, ASJADE PAKKIMINE JA TUBADEST VÄLJA KOLIMINE

12.00 ETTEKANDED

Eelika Kiil – Keemiline murenemine ja paleokeskkonna uuringud

Kristo Oks – Arheometallurgiast ja rauasulatamisest

Maaria Semm – Maakasutuse muutustest kaitsealadel

13:00 LÕPPSÕNA

13:30 LÕUNA

14:30 KOJUSÕIT

EESSÕNA

Eelika Kiil

Tartu Ülikooli geoloogia osakond, nooremteadur
eelika.kiil@ut.ee

Selleaastase sügiskooli teemaga „Geoloogia siis ja praegu” sobivalt vaatame ka eessõnas tagasi sügiskooli algusaegadele. On hea meel tõdeda, et esimese sügiskooli eessõna autorite soov on täitunud - „Teadus geoloogias. *Schola Geologica I*” pani aluse pikale sügiskoolide traditsioonile.

Aastate jooksul on sügiskool keskendunud päevakajalistele teemadele geoloogias, kuid 20. sügiskoolis soovime teha tagasivaate ja reflekteerida minevikku, kutsudes esinejaid teemadel, mis on varem juba käsitlust leidnud. Nii leiame seekordsest ajakavast teemad nagu tuumaenergia, stratigraafia, sood, Läänemere rannajoone muutused, geoloogiliste andmete säilitamine ja fosforiidi uuringud. Lisaks on sügiskoolides alati olnud omal kohal ka üldharivad ja silmaringi avardavad teemad, mis võivad ootamatult seostuda geoloogia ja geoloogidega. Nii leidsime teemad nagu teaduse populariseerimine, riigikaitse ja julgeolek, maakasutus ning arheometallurgia, tuues sellega ühtseks tervikuks kokku kirju juubeliaasta programmi.

Kuid... Veel aasta tagasi arutasime tõsimeeli korraldajatega, kas üldse jõuame juubeli tähistamiseni. Korraldajate meelekindluse pani vankuma korraks vähenenud huvi ja keeruline seis rahastusega. Samas oli rõõmustav näha, et aprillikonverentside traditsioon on taastunud ja geoloogide suvepäevad ning muud koosviibimised on muutumas aina populaarsemaks. Olles silmitsi identiteedikriisiga, otsisime sügiskoolile kohta tänases geoloogiamaastikus. Koosolekule kokku tulnud noored leidsid, et proovida tuleb midagi uut - nii sai uue hingamise idee tudengiselti loomisest ja selle alt sügiskooli korraldamisest. Ja see on lugu sellest, kuidas ühel tavalisel kolmapäeval muutus sügiskooli koosolek Geoteaduste Üliõpilaste Seltsi loomise koosolekuks. Ja ülejäänud on tänaseks ajalugu!

Kuigi sügiskooli formaat võib vajada väikest turgutust, toob Geoteaduste Üliõpilaste Seltsi kaudu noorte kaasamine kindlasti uue energia ja annab kindluse, et sügiskoolil on oma koht ja entusiastlikud korraldajad ka tulevikus.

Siinkohal ütleme siira aitäh kõigile, kes on nende aastate jooksul sügiskooli toimumise oma panuse andnud: Kairi Põldsaar, Oive Tinn, Imre

Andreas Martin, Johanna Maria Ojap, Sigrid Soomer, Kristjan Leben, Annamaria Krull, Tiina Harak, Maile Polikarpus, Kärt Paiste, Triine Nirgi, Päärn Paiste, Sander Olo, Viirika Mastik, Kaidi Sarv, Karin Kungla, Kaarel Lumiste, Tõnn Paiste, Hanna Raig, Siim Pajusaar, Katrin Lasberg, Ivar Puura, Kati Tänavsuu, Ulla Preeden, Kadri Rull, Alina Tshugai, Maria Dmitrijeva, Age Alviste, Tormi Tuuling, Veiko Karu, Evelin Versh, Kairi Ehrlich, Triin Tajur, Marta Lumi, Reet Nemliher, Leeli Amon-Veskimeister, Kadri Sohar, Liisa Lang, Karin Truuver, Liina Laumets ja paljud teised. Samuti suur aitäh selleaastasele korraldusmeeskonnale: Triinu Jairus, Markus Ausmeel, Krete Roopõld, Georg Rahu, Carmel Kuusk, Martin Riives, Martin Aava, Maileen Muttik, Astrid Jõerand, Anne Greete Gribulis, Heleriin Peterson ja Geoteaduste Üliõpilaste Seltsi asutajad.

GEOLOOGILISE KAARDISTAMISE TULEVIKUST 3D SUUNAGA

Tavo Ani

Eesti Geoloogiateenistuse geoinformatsiooni osakond, vanemgeoloog
Tavo.Ani@egt.ee

Geoloogilised 3D mudelid on kasulikud maavarade otsingutel, põhjavee uuringutes, keskkonnamõjude hindamisel ja paljus muus. Mudel võimaldab paremini kujutada ja mõista geoloogilist lasumust, protsesse ja ressurside paiknemist. Potentsiaal on tohutu ja järjest laieneb. Mudel iseenesest kujutab ka head vahendit alusandmete kontrolliks, sest vigased andmed eristuvad selgelt. Geoloogilisel kaardistamisel võimaldab mudel korralike alusandmete puhul loogiliselt mudeldada kivimkehade paiknemist, jätkumist ja avamusi. Eesti Geoloogiateenistuse andmebaasis on üle 5000 puuraugu andmepunkti, mille sügavus on vähemalt 30 meetrit ja üle 500 puuraugu, mis ulatuvad aluskorra kivimiteni. Selline andmehulk on enamiku piirkondade puhul piisav, loomaks usutavat 3D geoloogilist mudelit etteaimatava struktuurse asetusega settekivimitest. Omaette küsimus on loodava mudeli täpsus, kuna aastakümnetega võivad olla muutunud arusaamad kaardistatavate üksuste iseloomust ja omavahelistest piiridest, mis võib tingida mõnel juhul piiri kõikumise kuni 10 m. Üle Eesti on meil ligi 60 000 vaatlus- või puurauku, mille sügavus on kuni 30 m, millest üle 40 000 on sügavusega kuni 2 m. Kvaternaari setete puhul, kus võivad esineda maastikus tihedalt vahelduvad erinevad kulutuslikud, kuhjelised ja kulutatud pinnavormid, ei piisa olemasolevast andmetihedusest ega domineerivast sügavusest 3D mudelite loomiseks. Oma muutliku iseloomu tõttu on kvaternaari setete puhul hea 3D mudeli saamiseks vaja lausalisi andmeid, mida on võimalik koguda geofüüsikaliste meetoditega. Nendeks meetoditeks võivad olla näiteks seismitiline profileerimine, elektromagnetiline profileerimine ja georadar. Igal meetodil on omad eelised ja omad nõrkused. Nendest saadavad andmed on kasulikud ka maavarade otsingutel, sest ulatuvad sügavamale kui käsipuuri või labidaga saadav andmestik ning pakuks väiksemat ressursivajadust maavarade uuringutel või taristu loomisel. Geofüüsikaliste meetodite kasutusväärsus kaardistamisel sõltub meetodi kasutuskiirusest nii objektil kui järeltöötlusel, kui ka saadavas andmesügavuses ja selle abil erinevate setendite tuvastusvõimekuses.

METEORIITIKA LÜHIAJALUGU

Jüri Plado

Tartu Ülikooli geoloogia osakond, geofüüsika ja petrofüüsika kaasprofessor
juri.plado@ut.ee

Meteoriitika on teadusharu, mis tegeleb meteoriitide ja nende päritolu uurimisega. Laiemas kontekstis hõlmab meteoriitika ka meteoroorikehade langemisega seotud protsesse ning langemise tulemusel moodustunud pinnavorme. Seetõttu on meteoriitika tihedalt seotud mineraloogia, geokeemia, kosmokeemia ja geoloogiaga. Meteoriitika teaduslikud uuringud hõlmavad meteoriitide kogumist, identifitseerimist ja klassifitseerimist. Tüüpilised analüüsid keskenduvad meteoriiti moodustavate mineraalide keemilise koostise uurimisele, isotoopsuhete analüüsile ja radiomeetrilisele dateerimisele. Neid meetodeid kasutatakse meteoriidi vanuse, moodustumisprotsessi ja ajaloo määramiseks, pakkudes seeläbi teavet Päikesesüsteemi ja taevakehade ajaloo, moodustumise ning arengu kohta.

Maa atmosfääri jõudnud meteoroorkehad võivad kaasneva sähvatusena ja lööklaine tõttu pakkuda meeldejäädavat vaatepilti ning mõnikord ka heliefekte. Sellised elamused on ajast aega toitnud inimeste fantaasiat, kuid kosmiliste külaliste tegeliku päritolu mõistmine võttis aega sajandeid, mis olid täidetud skepsise ja ebausuga. Näiteks pidid India geoloogiateenistuse töötajad veel aastakümneid tagasi meteoriidi langemiskohale väga kiiresti jõudma, enne kui see pühitseti ja templisse viidi või väikesteks kildudeks lõhuti, et kivi sisalduvad kurjad hinged valla päästa (McCall, 1973). Indiaanlased pidasid meteoriite pühadeks objektideks, mis ühendasid taeva, maa ja vee; Aafrikas kanti meteoriidikilde amulettidena kaasas.

Rikkaliku rauasisaldusega meteoriite on kasutatud ka praktilistel eesmärkidel, sepistades neist nuge, pistodasid ja ehteid. Sellist kasutamist on dokumenteeritud (Farrington, 1900) näiteks inuitide seas Gröönimaal, Austraalia aborigeenide juures, aga ka India, Hiina, Tiibeti ja Mongoolia elanike seas. Aastal 2004 kirjeldati (Kotowiecki, 2004) Poolast leitud kirvest ja käevõrusid, mis olid valmistatud meteoriitsest rauast. Veelgi värskem (2012) on kirjeldus (Buchner et al., 2012) budistliku jumala Vaiśravaṇa (Tiibeti Jambhala või Namthöse, hinduistlik Kubera) 10,6 kg kaaluvast skulptuurist, mis valmistati ajavahemikus 8. kuni 11. sajandil Chinga

meteoriidist (Chinga jõgi asub Lõuna-Siberi ja Mongoolia piiril).

Egiptuse poiss-vaarao Tutanhamoni hauakambrist 1925. aastal leitud pistoda tera on valmistatud meteoriitsest rauast (Comelli, 2016). Kuna raudmeteoriidid sisaldavad palju niklit (Tutanhamoni pistodas koguni 10,8 massi% aga see pole rekord), kestavad meteoriidist valmistatud sepised kaua roostevabad. Millisest meteoriidist pistoda valmistati, jääb ilmselt saladuseks. Kas võis see olla Kaali raud, mida Tutanhamoni valitsemisajaks (1336-1327 eKr) juba Saaremaal leida oli (Martin, 2019; Losiak et al., 2016)? Kaali meteoriidi puhul peetakse võimalikuks, et seda on kasutatud Šveitsist 19. sajandil päevavalgele tulnud rauast nooleotsa sepistamisel (Hofmann et al., 2023). Saaremaalt pole küll ühtegi meteoriitse päritoluga eset kahjuks leitud, kuid Kaali raud on sepistatav, nagu Tõnu Narro oma magistritöös tõestas (Narro, 2012).

Paljude arvates võib vanimaks säilinud meteoriidiks pidada Mekas Kaaba templis asuvat nn Musta Kivi (al-Hajar al-Aswad). Viiteid langevatele tähtedele ja öötaevasse jutte joonistavatele helendavatele objektidele on leitud ka 4000 aasta vanustelt Egiptuse papüürusrullidelt (Nininger, 1959). Egeuse mere Párose saarelt leitud marmorplaatidele raiutud Kreeka kroonikas, mis pärineb aastatest 1582 kuni 299 eKr ja on tuntud kui Marmor Parium, kirjeldatakse meteoriitide langemist Kreetale aastal 1478 eKr, Kreeka keskossa Boiootiasse umbes 1200 eKr ning taas Kreetale 1168 eKr. Hästi dokumenteeritud on ka meteoriidid Hiina Hani dünastia ajast (206 eKr – 220 pKr), kusjuures selles nimekirjas on võrreldes tänapäeval Hiinasse langevate meteooride arvuga üsna palju kirjeldusi.

Tänapäevase meteoriitika kui teadusharu loojaks peetakse Saksa füüsikut Ernst Florens Friedrich Chladnit, kes uuris meteoriiti, mille leidis Saksamaalt pärit Peterburi ülikooli loodusajaloo professor, zooloog ja botaanik Peter Simon Pallas. Ühel oma reisil näidati Pallasile Siberis Ubeiski külas, mis asub 230 km Krasnojarskist, rauarikast 680 kg raskust kivi, mille oli avastanud kohalik sepp, kes ei suutnud seda sepistada. Aastal 1773 õnnestus Pallasel meteoriit² Krasnojarskisse transportida. Sealt saadeti taevakivi edasi Peterburi, kuhu see jõudis alles neli aastat hiljem. Sel ajal Venemaal raudteid ei olnud ning rasket kandamit transporditi regedel ja pigem talviti, et oleks lihtsam jõgesid ületada. Kuna koos kiviga liikusid ka

¹ Kaali meteoriidi niklisisaldus on Tutanhamoni pistoda niklisisaldusest mõnevõrra väiksem (Martin, 2019). Tutanhamoni elueal oli Kaali kraatriväli juba olemas (Losiak et al., 2016).

² Pallase raud on tänapäeval kategoriseeritud kui Krasnojarski meteoriit.

jutud selle olulisusest, vähenes meteoriidi kaal transpordi käigus nii mõnegi kilogrammi võrra (Gallant, 2002). Hiljem on seda meteoriiti veelgi tükeldatud, et jagada seda muuseumidele üle maailma.

Chladni oli mees, kes andis leiule Pallase nime. Kui varem arvati, et kõik taevast langevad kivid on vulkaanilist päritolu või moodustunud õhus lendlevast tolmust välgulöökide tagajärjel, siis 1794. aastal üheaegselt Riias (Chladni, 1794) ja Leipzigris avaldatud Chladni kirjutis, mida enamik tema kaasaegseid teadlasi esialgu naeruvääristas, suutis siiski maailmavaadet muuta. Chladni mainis Pallase leidu kui head näidet kosmosest pärinevast kivist (lisaks Argentina Campo del Cielo meteoriidile) ja püstitas ülejäänud tekkeviiside välistamise teel kolm tollal väga julget hüpoteesi:

1. *kivi ja raua kogumid langevad taevast,*
2. *atmosfääri läbimisel tekivad nendest tulekerad ning*
3. *kehad pärinevad kosmosest, olles päritolult ürgsed massid, millest pole kunagi planeete moodustunud, või on need planeetide fragmendid.*

Hüpoteeside kaitsmiseks kirjeldas Chladni oma artiklis kahtkümmet dokumenteeritud meteorokeha langemist Euroopas ja Põhja-Ameerikas aastatel 1676 kuni 1783. (Marvin, 1996)

Chladni püstitatud hüpoteeside tunnustamisele aitas kaasa kolm tähelepanuväärset meteorokeha langemist, mis toimusid erinevates Euroopa riikides peatselt pärast teose ilmumist. 16. juuni õhtul 1794. aastal nähti meteoori Itaalia keskosas, mõnikümmend kilomeetrit Firenzest lõuna pool. Meteoori langemist nägi palju tunnistajaid, nende hulgas ka Inglise turistid. Pealtnägijate sõnul kõrvetas üks meteoriit end läbi külapoisi mütsi, teised lõhkusid puuvõrasid. Osa kividest langes susisesdes tiiki. Tiik pumbati peagi tühjaks ning meteoriidid, sealhulgas juhuslikult ka tavalised kivid, müüdi suure raha eest inglastele. Kuigi pealtnägijate kirjeldusi ja meteoriite uurinud teadlased arvasid, et kivid moodustusid atmosfääris tolmuosakeste liitumise teel (Soldani, 1974) või pärinesid veealusest vulkaanipurskest, levisid leitud meteoriidid ja kuuldused taevast langenud kividest esmalt Inglismaale ja seejärel üle Euroopa.

Vaid poolteist aastat hiljem, 13. detsembril 1795. aastal, langes meteor Wold Cottage'isse Yorkshire'i krahvkonnas Inglismaal. Seda sündmust nägid pealt vaid vähesed, kuid maaomanik Edward Topham vedas 25,4 kg kaalunud ja kolmveerandmeetrise läbimõõduga leiu Londonisse ning hakkas seda raha eest näitama. Ta oli oma leiust nii vaimustatud, et avaldas meteoriidi kohta teadaande koos joonistatud pildiga ajakirjas „Gentlemen's

Magazine“ (Topham, 1797) ning püstitas 1799. aastal meteoriidi leidmise kohta punastest tellistest monumendi. Teinud nii enda kui ka kivi kuulsaks, müüs Topham meteoriidi mineraloog James Sowerby, kelle lapsed müüsid selle omakorda edasi Briti loodusloomuuseumile. Loodusloomuuseumis saab seda suurimat Briti saartelt leitud Wold Cottage'i kondriiti siiani imetleda.

Kolmas Chladni teooriaid toetav vahejuhtum toimus 26. aprilli 1803. aasta pärastlõunal, kui Prantsusmaal pisikese Normandia linna L'Aigle'i kohal sadas alla vähemalt 3000 tükist koosnev kivirahe. Sellest sündmusest kuulnud Prantsusmaa teaduste akadeemia saatis asja uurima 29-aastase Collège de France'i füüsikaprofessori Jean-Baptiste Biot'. Biot' läkitati sündmuskohale põhjusel, et vahetult enne L'Aigle'i sündmust oli ta avaldanud oletuse, mille kohaselt meteoriidid pärinevad vulkaanipursetest Kuul (Biot, 1802). Biot lähenes sündmuse uurimisele teaduslikult, tutvudes esmalt piirkonna geoloogiliste tingimuste ja kivimitega. Pärast meteoriitide kirjeldamist ning usaldusväärsete inimeste (usaldusväärseteks pidas Biot eelkõige vaimulikke ja ametnikke) küsitlemist jõudis Biot „meteoriitsele“ järeldusele. See tugines faktidele: taevast langenud kividega sarnaseid kivimeid ega inimeste poolt loodud objekte enne kivisadu sealkandis ei esinenud ning sündmuse päeval ilmus maapinnale suur hulk identse koostise ja välimusega kivimeid. Kuigi Prantsuse akadeemia aktsepteeris Biot' järeldust, ei võtnud sugugi kõik uusi ideid omaks. Näiteks keeldus tollane USA president Thomas Jefferson uskumast, et aastal 1807 Connecticutis langenud Westoni meteoriit on maavälist päritolu. Talle võib selle andeks anda, sest veel 1859. aastal püüti meteoriitide atmosfäärivälise päritolu hüpoteesi naeruvääristada (Silliman, 1859).

Umbkaudu 19. sajandi keskpaigani pooldas osa teadlaskonnast ideed, et meteoriidid pärinevad Kuu kunagistest, nüüdseks hääbunud vulkaanidest. Sellele teooriale tõmbas pidurit Ameerika astronoom Benjamin Apthorp Gould, kes arvutas välja, et igast viiest miljonist Kuu vulkaanidest orbiidile paiskunud kivifragmendist jõuaks Maale kõigest kolm (Gould, 1859). Kuigi aastal 1859 oli teada kokku vähem kui 200 meteoriiti, oli neid piisavalt palju ning astronoomilised teadmised Kuust olid piisavalt head, et väita: pärast oma teket ei ole Kuu oma materjalist eriti palju Maale kaotanud. Samal ajal püstitas Ameerika keemik John Lawrence Smith lisaks Kuu vulkaanide hüpoteesile veel ühe, mille kohaselt on ka „muud võimalikud jõud“ (ingl *other disruptive force*) võimalised Kuu pealt kive ilmaruumi lennutama (Smith, 1855).

Kulus veidi rohkem kui sajand, enne kui ameeriklane John Schutt³ leidis 1982. aastal Antarktika jääst Kuult pärineva meteoriidi, mida ta algselt pidas lihtsalt ebaharilikuks. Schutt saatis meteoriidi, mille nimeks sai Allan Hills 81005, Smithsoni Instituuti Washingtonis, kus kinnitati, et leid erineb tõepoolest varasemalt leitud meteoriitidest ning märgati selle sarnasust Apollo programmi käigus Kuult toodud kivimitega. Aastaid hiljem tõestasid jaapanlased, et Antarktikast juba 1979. aastal üles korjatud meteoriit Yamato 791179 on samuti kuise päritoluga. Augusti 2024. aasta seisuga on mineraloogiliste, keemiliste ja isotoopkoostiste uuringutega tõestatud, et 698 meteoriiti pärineb Kuult (Lunar and Planetary Institute, 2024). Need leiud pärinevad jäistest ja liivastest kõrbetest Antarktikas, Põhja-Aafrikas ja Araabia poolsaarel; siiski pole ühegi kuu-meteoori langemist dokumenteeritud.

Tänaseni käivad vaidlused selle üle, kui suur peab olema Kuu kraater, et materjal võiks selle tekkimise käigus orbiidile lennata. Teadlased püüavad üksteist üle trumbata, pakkudes välja järjest väiksemaid mõõtmeid. 1994. aastal leidis Paul Warren (Warren, 1994), et kraatri läbimõõt võiks olla paar kilomeetrit. Tema peamiseks argumendiks oli kuumeteoriitide vanus – kõik avastatud meteoriidid on Kuult teele saadetud viimase 20 miljoni aasta jooksul – ja fakt, et selle aja vältel ei ole Kuule tekkinud hiiglaslikke kraatreid. 2001. aastal mudeldati (Head, 2011) kraatri teket Kuu tingimustes ning jõuti järeldusele, et plahvatusel, mis tekitab kraatri läbimõõduga alla 1,1 km (võimalik, et isegi alla 450 m), piisab, et anda väljapaiskematerjalile paakiirus, mille väärtus Kuul on 2,38 km/s.

Chladni töö ja teated uutest taevast langenud kividest inspireerisid kogu Euroopa teadlasi uurima neid eksootilisi kive. Prantsuse keemik Joseph Louis Proust uuris Mesón de Fierro meteoriidi (Campo del Cielo raudmeteoriidi fragment) killukest ja sai seninägematu tulemuse: meteoriit sisaldas 10 massi% niklit (Proust, 1799). Proust ei teinud sulami päritolu kohta järeldusi ning jättis lahtiseks, kas tegu on inimese või looduse toodanguga. Samaaegselt Proustiga töötasid meteoriitide koostise kallal ja mõtisklesid nende päritolu üle Briti keemik Edward Charles Howard ja Prantsuse mineraloog Jacques Louis de Bournon. Bournon kirjeldas esimesena meteoriitides leiduvaid „kentsakaid keramid“, mille Gustav Rose hiljem Berliini Humboldti Ülikooli mineraloogia muuseumist nimetas

³ Ameerika geoloog John Schutt on osalenud rohkem kui 35 meteoriitide kogumise ekspeditsioonil Antarktikas. Arvatakse, et Schutt on leidnud rohkem meteoriite kui ükski teine inimene ajaloos, sealhulgas ka Kuult ja Marsilt pärinevaid.

kondriteks (vana-kreeka χόνδρος – tera). Praeguste teadmiste kohaselt on kondrid vanim vaadeldav materjal ja need moodustusid Päikesesüsteemi-eelses udukogus mineraalsete sulatilkade jahtumisel.

Howard proovis meteoriitidest eraldada punakas-kollast rauasulfiidi, mis erines kõigist seni tuntud maapealsetest sulfiididest, näiteks püriidist (FeS_2), suurema rauarikkuse poolest. Seda sulfidset mineraali oli juba 1766. aastal märganud Itaalia abt Domenico Troili, kes arvatavasti dokumenteeris esimese inimesena meteoori (Alaberto) langemise (Troili, 1776). Pronkspruuni mineraali märganud abt andis sellele nimeks *marchesita*, mida võiks tõlkida kui „pisike markiis“; see nimi vastab ka araabiakeelsele sõnale püriidi kohta. Sajand hiljem sai see mineraal (FeS) Troili auks nimetuse troiliit.

Howard avaldas 1802. aastal artikli (Howard, 1802), milles kirjeldas nelja kivismeteoriidi (Siena, Wold Cottage, Tabor ja Benares) ning nelja raud- või kivi-raud-meteoriidi (tänapäevaste nimedega Krasnojarsk, Steinbach, Campo del Cielo ja Siratik) sarnasusi ja erinevusi ning võrdles nende keemilist koostist rauamaakide koostisega. Ta leidis kõigist raud- ja kivi-raudmeteoriitidest troiliiti ning suhteliselt suures koguses niklit. Samuti märkis ta, et kõiki uuritud kive kattis õhuke musta rauaoksiidi kiht – sulamiskoorik, nagu me nüüdseks teame. Howard ei julenud analüüside tulemuste põhjal kaugeleulatuvaid järeldusi teha. Ta lõpetas artikli hoopis küsimustega meteoriitide päritolu kohta:

„Esiteks. Kas kõik langenud kivid ja see, mida kutsutakse ehedaks rauaks, pole mitte sama päritolu? Teiseks, kas kõik või mõni neist on meteoroidide loodud või osa neist endist? Ja lõpuks, kas Yorkshire'i kivi ei võinud olla osa meteorist, mis kukkus alla piirkonnas, mis on selle avastamiseks liiga kõrge?“

1804. aastal avaldas inglise geoloog Guglielmo Thomson metallograafilised mustrid, mille ta oli avastanud Pallase raua löikepinna lihvimisel ja happega söövitamisel. Thomson ei uskunud meteoriidi kosmilisse päritolusse, vaid arvas, et raud on tekkinud maalt pärineva tolmu konsolideerumisel atmosfääri ülemistes kihtides. Samuti avastas ta, et meteoriiti moodustav raud lahustub happes erinevalt: kohati kiiremini ja kohati aeglasemalt. Aastal 1808 avastas need samad struktuurid Thomsonist sõltumatult Alois von Beckh Widmanstätten, kes tollal juhatas Viinis keisrile kuuluvat tehnika erakollektsiooni *Fabriksproduktenkabinett* ja kellele meeldis lõigatud ja lihvitud meteoriitidega katsetamine. Kuna tema perekonnale kuulus kunagi trükivabrik, meenutasid meteoriitide söövitatud

pinnad talle ilmselt trükiplaate, millena ta neid ka agaralt kasutas. Von Widmanstätten ei mõtisklenud „trükiplaatide“ päritolu üle ega avaldanud kunagi oma pilte, vaid näitas neid kolleegidele ja sõpradele, kes hakkasid nähtut nimetama Widmanstätteni struktuurideks. Pildid struktuuridest avaldas 1820. aastal Widmanstätteni hea sõber Carl von Schreibers. Kuna struktuuride avastamise ajalooline au kuulub tegelikult Thomsonile, tundub Widmanstätteni nime kasutamine ebaõiglane. Samas on Widmanstätteni nime struktuuride kirjeldamisel kasutatud juba kaks sajandit ning viited Thomsoni struktuuridele tekitaksid vaid segadust.

Eelpool kirjeldatud avastused ja diskussioonid sattusid ajale, mil astronoomid „hakkasid täitma“ tühimikku Marsi ja Jupiteri orbiitide vahel. Esmalt avastas Itaalia Giuseppe Piazzi 1801. aastal asteroidide vöö suurima objekti, peaaegu tuhande kilomeetrise läbimõõduga kivist ja jääst koosneva, omaenese raskusest ümaraks muutunud kääbusplaneedi. Piazzi, kes alguses arvas, et on leidnud planeedi, andis taevakehale Vana-Rooma mütoloogilise taimede ja põlluharimise jumalanna järgi nimeks Ceres. Ceres ja asteroidide vöö suuruselt järgmiste objektide, Pallase, Juno ja Vesta avastamine vastavalt aastatel 1802, 1805 ja 1807 Saksa astronoomide Heinrich Wilhelm Olbersi ja Carl Ludwig Hardingi poolt toetas tugevalt Chladni hüpoteese kosmosest pärinevate kehade kohta. Muidugi oli Chladni nendest leidudest vaimustuses (Chladni, 1805), kuid meteoriitide asteroidset päritolu ei hakatud kohe laialdaselt tunnustama. Üheks põhjuseks võis olla see, et ajavahemikus 1807-1845 ei avastatud lisaks teadaolevale neljale ühtegi uut asteroidi. Aastatel 1845-1854 leiti neid 20. Üheksateistkümnenda sajandi lõpuks oli kataloogitud umbes 400 asteroidi ja 20. sajandi lõpuks 900; augustiks 2024 on nimetuse saanud üle 35 000 suurema ja väiksema asteroidide vöös tiirleva keha (NASA Center for Near Earth Object Studies, 2024). Nüüdseks on teada, et valdav enamus Maalt leitud meteoriitidest pärineb asteroidide vööst.

Seega hääbusid 19. sajandi keskpaiku tasahilju ideed meteoriitide atmosfäärsest ning vulkaanilisest päritolust. Nende asemel kogus hoogu terve sajandi kestnud vaidlus meteoriitide asteroidse ning Päikesesüsteemi-välise päritolu vahel. Meteoriitide Päikesesüsteemi-sisese asteroidse päritolu kohta tehti vihjeid juba 19. sajandi alguses, samaaegselt nelja suure asteroidivöö keha avastamisega, kuid need vihjed langesid viljatule pinnasele. 1854. aastal, pärast paarikümne asteroidi avastamist, väitis Inglise teadlane Robert P. Greg, et meteoriidid on asteroidide imepisikesed kaaslased, kusjuures nii asteroidid kui meteoriidid on

tekkinud ühestainsast planeedist seda tabanud kolossaalse kataastroofi tulemusel (Greg, 1854). Oma väidete toetuseks tõi ta faktid, et asteroidid tiirlevad ümber Päikese samas suunas kui planeedid ning asteroidid on pigem nurgelise kui ümara kujuga. Viimane fakt põhineb sellel, et teleskoopidesse jõudev asteroididelt peegeldunud valguse intensiivsus muutub järsult, mitte sujuvalt.

Sellal kui astronoomid hoidsid pilku taevastel avarustel, uurisid geoloogid ja mineraloogid meteoriitide omadusi. Prantsuse mäeinsener ja poliitik Adolphe André Marie Boisse järjestas meteoriidid tiheduse alusel: ta alustas suhteliselt suure tihedusega raudmeteoriitidest ja lõpetas väiksema tihedusega ränirikaste kivimeteoriitidega (Boisse, 1850). Järjestuse tulemusena sai ta Maa läbilõikega sarnase läbilõike kunagisest meteoriitide koduplaneedist. Sellise arutelu tulemus veenis geologe meteoriitide asteroidses päritolus.

Eksisteerib veel üks Maa-lähedane taevakeha, mille kivimaterjal on Maa peale jõudnud. See on Marss. Marsi meteoriite (august 2024 seisuga 380 tükki) on leitud vähem kui Kuu meteoriite. Muidugi on Marss Maast oluliselt kaugemal kui Kuu ning paakiirus Marsil (5,03 km/s) pea kaks korda suurem kui Kuul, mistõttu läheb materjali kosmosesse lennutamiseks tarvis mõnevõrra suuremat kokkupõrget ja sellega kaasnevat plahvatust. Kolme meteoriidi võimalikku Marsi päritolu oletati 1979. aastal (Wasson and Wetherill, 1979; Nyquiste et al., 1979) analüüsides neis esinevate jälgelementide ning hapnikuisotoopide suhteid. Need meteoriidid olid nn SNC-meteoriidid – see lühend tuleneb Shergotty (India, 1865), Nakhla (Egiptus, 1911) ja Chassigny (Prantsusmaa, 1815) meteoriitide esitähedest. SNC tüüpi akondriidid jäid uurijatele silma juba pool sajandit varem tänu nende noorusele: nende isotoopvanus jääb 360-1300 miljoni aasta piiresse, mis on väga väike, võrreldes teiste meteoriitide (ning ligikaudu ka Maa) vanusega.

Aastal 1983 avaldasid NASA töötajad Bogard ja Johnson artikli gaasidest Antarktika meteoriidis (Bogard and Johnson, 1983). Vaatamata tagasihoidlikule küsimärgile pealkirjas tõestasid nad, et osa Maa peale jõudnud meteoriite pärineb Marsilt. Nad analüüsisid Allan Hills (ALH77005) ja Elephant Moraine (EET79001) meteoriitide kuumutamisel eralduvate gaaside keemilist koostist ja leidsid, et argooni ja ksenooni isotoopsuhted (täpsemalt $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ja $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$) on väga sarnased suhetele, mida mõõdeti NASA Viking-missioonide (1975-1983) käigus Marsi atmosfääris.

Kuidas on lood teiste Maa-tüüpi taevakehadega; kas Maale on jõudnud

mõni meteoriit ka Merkuurilt või Veenuselt? Veenuselt vaevalt. Veenuse paakiirus on suur (10,36 km/s) ja üsna sarnane Maa paakiirusele. Lisaks on Veenusel väga tihe atmosfäär (planeedi pinnal 65 kg/m³), mis ületab Maa vastava näitaja lausa viiekümnekordselt. See tähendab, et Veenuselt on kiviprügil väga keeruline orbiidile pääseda ja selleks läheb tarvis väga tugevat plahvatust. Ühtegi Veenuselt pärit meteoriiti Maalt leitud ei ole. Võrreldes Veenusega on Merkuur vaatamata suuremale kaugusele Maast ja Päikese lähedusele sobivam kandidaat Maale meteoroidide läkitamiseks. Merkuuri gravitatsioon on suhteliselt väike, mistõttu on väike ka paakiirus (4,25 km/s) ning atmosfäär praktiliselt puudub. Merkuuri orbitaalkiirus on tänu Päikese lähedusele planeetidest suurim (47,87 km/s), mis tähendab, et asteroidid saavad sinna kiirusega 20 kuni 50 km/s ega pidurdu atmosfääris. Võrreldes teiste planeetidega võimaldab see asjaolu kokkupõrkel tugevamaid plahvatusi, suurema koguse kosmoseprügi teket ning jõudmist heliotsentrilisele orbiidile ja teistele planeetidele. Arvutuste (Gladman and Coffey, 2009) kohaselt jõuab pärast Merkuuril toimunud meteoriidiplahvatust 10 miljoni aasta vältel Maale 0,1 protsenti selle plahvatuse tagajärjel ilmaruumi paiskunud kivimitest. Seega eksisteerib õhkõrn võimalus, et me tulevikus mõne sellise kivimpala ka leiame.

Aastal 1803 avaldas pilvedelt langevatest kividest vaimustunud Prantsuse amatöörgeoloog Étienne-Gilbert de Drée esimese „noore“ meteoriitide klassifikatsiooni (Drée, 1803). Kuigi de Drée valduses olid vaid üksikud meteoriidid, tutvus ta põhjalikult olemasolevate kirjeldustega ning lõi klassifikatsiooni, mis tugines peamiselt langemise asjaoludele. Tänapäeval toob see klassifikatsioon muige näole, demonstreerides otsatut eesootavat tööd meteoriitide mõistmisel ja sisulise klassifikatsiooni loomisel:

1. Kivid, mis sisaldavad *Salles'is*, *Ensisheimis*, *Barbotanis*, *Benaresis* ja *Wold Cottage'is* äikesetormita pilvitutel päevadel toimunud langemistega sarnaseid materjale.
2. Klass I sarnanevatest materjalidest koosnevad kivid – *Siena* ja *Tabor* –, mis langesid leegitsevatest pilvedest koos valgussähvatuste ning koos või ilma plahvatusteta.
3. Sepistatava raua massid, millest üksainukene langemine juhtus *Agramis*, *Horvaatias*, pärast tulekera ja plahvatust, millele järgnesid kõmisevad hääled.
4. Kõik massid, mille langemise asjaolud ei ole tõestatud ning mille koostised erinevad kolmest esimesest klassist või on selgusetud.

Tänapäevaste klassifikatsioonide, sealhulgas ka värskema nn Weisbergi meteoriidide päritoluga arvestava klassifikatsiooni (Weisberg *et al.*, 2006) aluseks on saksa mineraloogi Gustav Rose ja inglise geoloogi Nevil Story Maskelyne meteoriidide uuringud ja kataloogimine 1860ndatel aastatel vastavalt Berliini Ülikooli ja Briti Muuseumi juures. Maskelyne jagas meteoriidid sideriidideks (raudmeteoriidid), sideroliitideks (kivi-raud-meteoriidid) ja aeroliitideks (kivimeteoriidid). Rose omakorda jaotas kivimeteoriidid kahte rühma vastavalt sellele kas nad sisaldavad kondreid või mitte – kondriitideks ja mitte-kondriitideks.

Leitud meteoriiidi rühmitamiseks on vaja teha laboratoorsed uuringud. Uuringute hulka kuuluvad esmalt makro- ja mikroskoopilised vaatlused – millised mineraalid meteoriiidi moodustavad, millised on struktuurid (mineraalide suurus ja omavahelised suhted) ja tekstuudid (mineraalide paigutus ja ruumitäitmisviis). Optilise ja elektronmikroskoopia abil uuritakse mineraalide „värskust“: kas ja kui palju on meteoriiiti moodustavad mineraalid soojuse või vedelike ja gaaside mõjul moonduvad. Klassifitseerimise eesmärgil on tarvis teada leidude keemilist koostist, sageli ka isotoopkoostiseid. Meteoriidides esinevaid keemilisi elemente ja suuremat osa mineraale esineb ka Maal, kuid erinevas kontsentratsioonis ja suhtelises vahekorras.

Kindlasti ei jää Weisbergi klassifikatsioon viimaseks, ka seda saab arendada ja mida rohkem meteoriidide Maalt leitakse, mida rohkem petrooloogilisi kirjeldusi lisandub ja mida kiiremaks ja tõhusamaks muutuvad laboratoorsed keemiliste elementide ning isotoopide uuringud, seda kiiremini see toimub. Klassifikatsioon täpsustub ka uute missioonidega Kuule, Marsile, asteroididele ja miks mitte komeetidele. Teiste Päikesesüsteemi kehade kohta käivate teadmiste areng võimaldab tulevikus meteoriidide klassifitseerida geoloogilises kontekstis. See tähendab et meteoriididele püütakse leida emakeha, olgu siis hävinud või siiani eksisteeriv, ning võimalusel seostada meteoriiiti emakehal toimunud protsessidega.

Artikli aluseks on raamatus „Meteoorist kraatrini“ (Plado, 2019) avaldatud tekst.

Kasutatud kirjandus

- Biot J.-B., 1802. Note sur des substances pierreuses d'une nature particulière, que l'on assure être tombées sur la terre. Bulletin des sciences, par la Société philomathique de Paris, 66, 159-160.
- Bogard D.D., Johnson P., 1983. Martian Gases in an Antarctic Meteorite? Science, 221, 651-654.
- Boisse A.-A.-M., 1850. Recherches sur l'histoire, la nature et l'origine des aérolithes. Rodez, Imprimerie de N. Raterly, imprimeur de la Société, rue Neuve, 120 pp.
- Buchner E., Schmieder M., Kurat G., et al., 2012. Buddha from space – An ancient object of art made of a Chinga iron meteorite fragment. Meteoritics & Planetary Science, 47, 1491-1501.
- Chladni E.F.F., 1794. Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen. Riga, Johann Friedrich Hartknoch, 63 pp.
- Chladni E.F.F., 1805. Einige kosmologische Ideen, die Vermehrung oder Verminderung der Masse eines Weltkörpers betreffend. Annalen der Physik, 19, 257-281.
- Comelli D., D'Orazio M., Folco L. et al., 2016. The meteoritic origin of Tutankhamun's iron dagger blade. Meteoritics & Planetary Science, 51, 1301-1309.
- Drée E. Marquis de, 1803. Suite de recherches sur les masses minérales dites tombées de l'atmosphère sur notre globe. Journal de Physique LVI, 405-427.
- Farrington O.C., 1900. The worship and folklore of meteorites. The Journal of American Folklore, 13, 199-208.
- Gallant R.A., 2002. Meteorite Hunter: The Search for Siberian Meteorite Craters. McGraw-Hill, New York, 231 pp.
- Gladman B., Coffey J., 2009. Mercurian impact ejecta: Meteorites and mantle. Meteoritics & Planetary Science, 44, 289-291.
- Gould B.A., 1859. On the Supposed Lunar Origin of Meteorites. Proceedings of the American Association for the Advancement of Science, 13, 181-187.
- Greg R.P., 1854. Observations on meteorites or aerolites, considered geographically, statistically, and cosmically, accompanied by a complete catalog. Philosophical Magazine, 8, 329-342 ja 449-463.
- Head J.N., 2001. Lunar meteorite source crater size: Constraints from impact simulations. Lunar and Planetary Science Conference, XXXII, 1768.
- Hofmann B.A., Schreyer S.B., Biswas S. et al., 2023. An arrowhead made of meteoritic iron from the late Bronze Age settlement of Mörigen, Switzerland and its possible source. Journal of Archaeological Science, 157, 105827.
- Howard E.C., 1802. Experiments and observations on certain stony and metalline substances, which at different times are said to have fallen on the Earth; also on various kinds of native iron. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, 92, 168-212.
- Kotowiecki A., 2004. Artifacts in Polish collections made of meteoritic iron. Meteoritics & Planetary Science, 39, 151-156.
- Losiak A., Wild E.M., Geppert W.D. et al., 2016. Dating a small impact crater: An age of Kaali crater (Estonia) based on charcoal emplaced within proximal ejecta. Meteoritics & Planetary Science, 51, 681-695.
- Lunar and Planetary Institute, 2024. Meteoritical Bulletin Database.

<https://www.lpi.usra.edu/meteor/>

Martin I.-A., 2019. Kaali raudmeteoriidi petrograafiline ja geokeemiline kirjeldus. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, 34 lk.

Marvin U.B., 1996. Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) and the origins of modern meteorite research. *Meteoritics & Planetary Science*, 31, 545-588.

McCall G.J., 1973. *Meteorites and their Origins*. John Wiley & Sons, New York, 352 pp.

Narro T., 2012. *Meteoriitraud. Kui rauaaeg algas kiviajal*. Magistritöö, Eesti Kunstiakadeemia, disainiteaduskond, 88 lk.

NASA Center for Near Earth Object Studies, 2024. *Discovery Statistics*.
<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>.

Nininger H.H., 1959. *Out of the Sky*. Dover Publications, New York, 336 pp.

Nyquist L.E., Bogard D.D., Wooden L.J., et al., 1979. Early differentiation, late magmatism and recent bombardment of the shergottite parent body. *Meteoritics*, 14, 502.

Plado J., 2019. *Meteoorist kraatrini*. Argo, 176 lk.

Proust J. 1799. *Sur le fer natif du Pérou*. *Journal de Physique, de Chimie*, 49, 148-149.

Silliman, G.S. (Hepsey Ely), 1859. *On the origin of aerolites*. W.C. Bryant, New York, 31 pp.

Smith J.L., 1855. *Lecture on meteoric stones*. Annual Report Smithsonian Institution, 151-174.

Soldani A., 1794. *Sopra Piogetta di Sassi Accaduta Nella Serf de 16. Giugno 1794 in Lusignan d'Asso Nel Sanese*. Doktoriväitekiri, Siena, 288 pp.

Topham E., 1797. *Letter to Mr. Urban*. *Gentlemen's Magazine*, 67, 549-551.

Troili D., 1766. *Ragionamento della caduta di un sasso*. Modena, 43 pp.

Warren P.H., 1994. Lunar and martian meteorite delivery services. *Icarus*, 111, 338-363.

Wasson J.T., Wetherill G.W., 1979. Dynamical, chemical and isotopic evidence regarding the formation locations of asteroids and meteorites. In: *Asteroids* (eds. Gehrels, T., Matthews, M.S.), University of Arizona Press, 926-974.

Weisberg M.K., McCoy T.J., Krot, A.N., 2006. Systematics and evaluation of meteorite classification. In: *Meteorites and the Early Solar System II* (eds. Lauretta, D.S., McSween, Jr. H.Y.). The University of Arizona Press, 19-52.

ARHEOMETALLURGIAST JA RAUASULATAMISEST

Kristo Oks

Tartu Ülikooli arheoloogia osakond, magistrant
kristo.oks@gmail.com

Geoloogial ja arheoloogial palju ühist, olgu see siis mõiste “stratigraafia”, ränivetikad, fotoluminestsentsi meetod või Läänemere punane kvartsporfüür. Võimalusi nende kahe teadusvaldkonna sidumiseks on lõputult ja suuremalt jaolt võib selle eest tänulik olla arheoloogia interdistsiplinaarsusele, mis võimaldab humanitaarteaduslike võtete kõrval kasutada inimeste ja nende ühise ajaloo uurimiseks ka arvukalt erinevaid loodus- ja täppisteaduslikke meetodeid. Käesolev ettekanne keskendub sellisele arheoloogia harule nagu arheometallurgia, millel on samuti tugev seos loodusteadustega.

Arheometallurgia tegeleb erinevatest metallidest esemete, toorainete, tootmisjääkide ja -rajatiste ning samuti kaubanduse uurimisega. Esemete puhul on võimalik uurida nende keemilist koostist, füüsi(ka)lisi omadusi ja ka esemete tootmisvõtteid. Vaadates mikroskoobiga mõne metalleseme ristlõike mikrostruktuuri on võimalik saada teavet erinevate termo- ja survetöötlusviiside kohta, sest kõik metallurgide töövõtted jätavad oma jälje kas metalli mikrostruktuuri või selle keemilisse koostisesse. Väga palju olulist teavet annavad ka erinevad tootmisjäagid, milleks metallurgia seisukohalt on peaaegselt šlakk, väiksemad metallitükid, tiiglite ja valuvormide katked või sulatusahjude ja ääside jäänused. Mõistagi kõnetavad arheometallurge esemete uurimise kõrval ka palju suuremad küsimused nagu näiteks metallide tootmisvõtted ja -protsess tervikuna, nende tootmis- ja töötluspaikade levik ning paiknemine maastikul nii geograafilises kui ka asustusloolises mõttes, ja ka metallikaubandus. Siinkirjutaja uurimisteeneks on Eesti kohalik rauatootmine, mis hõlmab rauasulatuskohtade kaardistamist, nende toodangu analüüsimeetodeid ja rauasulatusprotsessi (re)konstrueerimist eksperimentide põhjal.

Kohalik rauatootmine algas Eestis praeguste teadmiste kohaselt ajaarvamise vahetuse paiku ehk umbes kahe tuhande aasta eest ning kestis vahelduva intensiivsusega 18. sajandini välja, kuigi suuremas mastaabis lõppes kohalik rauatootmine 15. sajandil, kui kvaliteetsem ja odavam Rootsi

raud kohaliku toodangu turult tõukas.

Kohalike rauasulatuspaikade arheoloogilise uurimise kõrval on raua kui materjali tootmise paremaks mõistmiseks väga oluliseks meetodiks eksperimentaararheoloogia. Arheoloogilises aineses säilivad vaid tummad esemed ja rauasulatusprotsessi Eestis ei kirjelda mitte ükski keskaegne kirjalik allikas. Seega on asjast võimalik rohkem aimu saada, kui püüda ise rauda sulatada, kasutades selleks kodu- ja välismaiseid arheoloogiaandmeid rauasulatusahjude ehitusest, teadmisi keemiast ja füüsikast, jättes olulise ruumi ka intuitsioonile.

Eestis tehti rauasulatuskatsetega algust juba 1978. aastal, kui ehitusinsener Arvi Lauringson tahtis tõestada, et Eesti kohalikust rauamaagist on võimalik metallilist rauda sulatada. 1980.–1990. aastatel tegi katseid arheoloog Jüri Peets, kelle eesmärgiks oli kohalikust maagist sulatada suurtes kogustes rauda. Peale mõningast pausi eksperimentide aegreas tegi 2015. aastal asjaga uuesti algust arheoloog Ragnar Saage, kelle katseid iseloomustab teaduslik huvi rauasulatusprotsessi detailide vastu nagu kohalike maakide keemiline koostis ja nende sobivus raua tootmiseks, samuti kohalike savide sobivus rauasulatusahjude ja ääside ehituseks. Sellise lähenemisviisiga on õnnestunud kasvatada toodetud raua kaalu mitmekordselt, aga tehtud ka olulisi tähelepanekuid eelmainitud detailide osas.

Raua tootmiseks Eestis on kasutatud limoniiti ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mida rahvasuus tuntakse ka sooraua nime all. Aga seda, kuidas saab limoniidist metalliline raud, kuulevad huvilised juba ettekandes. Kel ettekannet kuulata ei õnnestu, leiab huvi korral järgnevast loetelust küllalt kasulikku lugemist:

- Lauringson, Arvi 1995. Eesti raua radadel. Rauaraamat. Tallinn.
- Lauringson, Arvi 1978. Nagu kaks tuhat aastat tagasi. – Horisont.
- Peets, Jüri 2003. The power of iron. – Muinasaja Teadus 12. Tallinn.
- Saage, Ragnar 2018. Huunide ragomisest ja ravva tsagamisest. – Tutulus. Tartu.
- Oks, Kristo 2023. Edukas rauasulatuskatse Rookse külas. – Tutulus. Tartu.
- Oks, Kristo 2024. 45 aastat rauasulatuskatseid Eestis: mis, miks ja kuidas? – Horisont, nr 3.

GEOLOOGIA ROLL EILE, TÄNA JA HOMME

Erik Puura

Eesti Geoloogia Seltsi juhatuse esimees, TalTechi ettevõtlusprorektor
erik.puura@taltech.ee

Pealkirjas on kasutatud geoloogilist ajaskaalat, 'eile' all pean silmas aega, mil ma ise Tartu Ülikooli õppisin ning homme siis vastavalt kusagil 40 aasta pärast, aastal 2064.

Just 1980ndad oli see aeg, kui õhus olid esimesed indikaatorid sellest, et 'klassikaline geoloogia' hakkab vajama muutusi. Klassikaline geoloogia sisaldas endas päris selgelt määratletud paketti, mida iga kõrgharidusega geoloog lihtsalt peab une pealt teadma: geoloogia ajalugu, ajalooline geoloogia, kristallograafia, mineraloogia, petrograafia, paleontoloogia, sedimentoloogia, geokeemia, maavarade geoloogia, kvaternaargeoloogia, ehitusgeoloogia, hüdrogeoloogia jne, mis kõik olid baasteadmiste poolt tugevdatud matemaatika, füüsika, keemia alustega.

Kõik need alused omandati ilma arvutite abita, geoloogidel ei olnud isegi koopiamasinat. Kui soomlased soovisid sõlmida geoloogia kateedriga koostöölepingut ja nad palusid enda poolt väljatrükitud paberitest teha teine koopia, siis vastas kateedrijuhataja 'muidugi', läks raamatukokku ja ütles masinakirjutajale „Ebe, lööge ümber“. Ometi ei jäänud mitte midagi tegemata ega omandamata. Hiljutisel seenelkäigul Kaiu järvede ääres jäi mulle silma üks suur kivi, mida oma mõõtmetelt saab nimetada ka rändrahnuks, metsa sees künka otsas. Ainult selle põhjal tuletasin välja, et seenemets minu ümber peab laiuma mõhnastikul ning suur rõõm oli hiljem meenutada, et olime Kaiu mõhnastikul ka rohkem kui 40 aastat tagasi ekskursioonil peatunud. Baasteadmised on need, mis olid, on ja jäävad eile, täna ja homme ning mida iga geoloog peaks kogu oma eluaja jooksul oskama loogiliselt seostada, ka selleks, et lapselaste küsimustele kvaliteetselt vastata.

Samas elasid geoloogid väga tugevasti oma liivakastis. Kui kateedrijuhatajale pakuti võimalust viia üliõpilased ekskursioonile Tšehhoslovakkiasse, siis oli vastus, et ei, see ei ole meie basseini. Mis ei vasta tegelikult tõele, aga see selleks – pigem võis keeldumise põhjus olla mujal. Läänemaailm oli üldse suletud ning praktikad viisid Krimmi, Tuvasse, Kamtšatkale ja teistesse väga eksootilistesse kohtadesse. Mina kuulusin

nende viimaste hulka, kes 1987. aastal veel Tuva praktikal käisid. Kahjuks jäi Tuvasse ka minu eelmisel aastal Karjalas välja antud soome ja vene segakeelne tööraamat, millest senini puudust tunnen, sest seda oleks hädasti vaja pensioniametisse saata tööstaaži jaoks.

Teises mõttes 'oma liivakast' tähendas seda, et lõpetanute töökohad ja vajadus geoloogide järele olid väga selgelt piiritletud ülikooli, teadusinstituudi, geoloogiateenistuse ja ehitusgeoloogia asutustega, kuhu peale lõpetamist kohustuslikus korras tööle suunati, parimad jättis ülikool endale. Geoloogia ei olnud läbi kasvanud teiste teadustega, eriti keskkonnateadustega. Seda kõike hakkas muutma 1980ndate lõpu fosforiidisõda, mis selgelt näitas, et geoloogiat ja keskkonnaprobleeme ei saa üksteisest lahutada. Selle lünga kõrvaldamine kujunes ka minu tööks, kui peale õpinguid Manchesteri ülikooli magistrantuuris ostsin sealsest raamatupoest 20 naela eest keskkonnageoloogia õpiku ning hakkasin selle põhjal Tartus keskkonnageoloogia õppeainet õpetama.

Et aru saada geoloogia rollist praegu, võib ülevaate saamiseks avada tavapärase geoloogiakonverentsi päevakava. Seal on seosed ökoloogiaga ja bioloogilise mitmekesisusega, klimatoloogiaga, mullateadusega, kosmoloogiaga jne. Geoloogia on üha enam interdistsiplinaarne, multidistsiplinaarne ja transdistsiplinaarne – õppige neil sõnadel vahet tegema, see on väga tähtis! Lisaks teavad juba koolilapsed, mis maailma ees ootab. Mäletan, kui mulle Manchesteri ülikoolis õpetati, et majandusteadus käsitleb maailma piiratud ressursside ja inimeste piiramatute vajaduste vahekorda. Selle definitsiooni sügavamõttelisus muutub iga aasta ja iga päevaga üha enam aktuaalseks, lisades siia kõik selle, kuidas inimtegevuse järjest intensiivistuv mõju on viinud nii inimese iseenda kui kogu meie planeedi elukeskkonna muutusteni. Mäletan, kuidas mu isa kunagi ütles, et tuleb aeg, kui kogu inimkond hüüab: arstid ja geoloogid, tulge appi. Nii ka läheb. Kas ja kuidas aga kogu selle lisainfo juures suudavad praegused geoloogiaüliõpilased omandada ka need kõik vajalikud baasteadmised, mida kirjeldasin, see on kindlasti aruteluteema.

Vaadates ette on just 40 aastat selline ajavahemik, kus inimtegevuse poolt põhjustatud muutused on kokku kukutanud kogu meie praeguse tavapärase mõtteviisi. Mina seda nii koloriitselt enam ei näe, teie näete. Ühe lihtsa näitena, meie praegused ärimudelid ja majandusarvutused loevad 'tasuta' väärtused nulliks. Puhas õhk, puhas vesi, ilus mets, mõnus ilm – need ei maksa mitte midagi. Selline mõtteviis viibki nende samade väärtuste kokku kukkumiseni. Inimkonnal on kaks võimalust: kas ootame

ära, kuni peame neile tasuta väärtustele juurde kirjutama hinnasildi ja püüame lasta sama moodi edasi, kuni jõuame olukorrani, kus püüame päästa seda, mida veel päästa annab. Või oleme targemad ja hakkame praeguseid 'tasuta väärtusi' adekvaatselt hindama.

STRATIGRAAFIAST SIIS JA PRAEGU

Olle Hints

Eesti Stratigraafia Komisjoni esimees, TalTech geoloogia instituudi direktor,
kaasprofessor
olle.hints@taltech.ee

Stratigraafia (ladina k *stratum*, kiht + kreeka k *graphia*, kirjutama) on geoloogia haru, mille eesmärgiks on maakoore kivimite organiseerimine eristatavateks kivimikehadeks ning nende ruumilise paiknemise ja vanuselise järjestuse kindlakstegemine. Teisisõnu loob stratigraafia meile ajalis-ruumilise taustsüsteemi, mis on aluseks geoloogiliste kaartide koostamisel ning geoloogilise arenguloo selgitamisel. Aga stratigraafiata ei saa hakkama ka maapõueinsenerid, sest erinevate omadustega kivimi- ja settekihte – stratigraafilisi üksusi – tuleb teada ja ära tunda nii kaevu puurimisel, ehitusgeoloogilisel uuringul kui paekarjääris lõhkamist planeerides.

Vajadus Eesti maapõue kihte tunda ja sealt kasulikke materjale leida oli kahtlemata olemas juba kiviajal. Detailsemast maapõue liigestamisest võib rääkida alates keskajast kui Põhja- ja Lääne-Eesti paemurdudes tegutsevad meistrid pidid tundma erinevaid paekihte ja nende omadusi. Teaduslikus tähenduses on Eesti stratigraafia sünniks 19. saj algus kui ilmusid esimesed aluspõhjaljandite kirjeldused ja ülevaated piirkonna geoloogiast (Severgin, 1808; Engelhardt, 1820; Strangways, 1821, 1822) ning Tartu Ülikooli filosoofiateaduskonna juurde loodi loodusteaduse ja mineraloogia õppetool ning mineraloogia kabinet (1820). 19. saj keskpaigaks oli Eesti aluspõhja stratigraafiline liigestus juba üsnagi detailne ning põhiüksused rööbistatud naabermaadega ning ajalooliste tüüpiladega Suurbritannias. Suurima panuse sellesse andsid F. Schmidti teosed (1858, 1879 jt), mis sisaldasid stratigraafilisi skeeme ja geoloogilisi kaarte. Samal perioodil algas ka pinnakatte jagamine erinevateks kihtideks.

Mitmeid F. Schmidti poolt väljapakutud kivimikehade nimesid, mis lähtuvad kohanimedest, näeme ka tänapäeva stratigraafilistel skeemidel ja geoloogilistel kaartidel, ainult Wesenbergist on vahepeal saanud Rakvere ja Raiküllist Raikküla. Teadlased ei ole tänaseni loobunud ka nn Schmidti indeksitest, kus nt Kukruse ladet tähistab indeks C_{II} (algne kirjpilt C_2 ; praktilisema meelega geoloogid kasutavad selle asemel O_3 KK). 19. sajandi

stratigraafia pioneeridel oli üksuste eristamiseks ja tuvastamiseks kasutada kaks peamist võimalust: kivimi- või settekeha litoloogilised tunnused (litostratigraafia) ja seal esinevad organismide jäänused, fossiilid (biostratigraafia). Just fossiilide rikkalik esinemine, nende tundmine ja asjatundlik kasutamine stratigraafias pani aluse Eesti aluspõhja sette kivimite stabiilsele liigestusele, mis peegeldab hästi piirkonna geoloogilist arengulugu. Eestipärased kohanimed ja eestikeelsed terminid võttis stratigraafias kasutusele H. Bekker 20. saj alguses ning maapõue liigestust täpsustasid siis lisaks temale P. E. Raymond, A. Öpik, A. Luha, K. Orviku jt geoloogid. Tänu maavarade, eriti põlevkivi ja fosforiidi uuringutele suurenes 20. saj märkimisväärselt ka stratigraafia praktiline tähtsus.

Nõukogude okupatsiooni tingimustes tuli Eesti maapõue liigendamisel lähtuda NSVLi stratigraafia-alasest nomenklatuurist – stratigraafia koodeksist – ja praktikatest, mis olid aluseks riiklikule geoloogilisele kaardistamisele jm geoloogilistele töödele. Vastavat tegevust koordineeris Moskvast riiklik stratigraafia komisjon ning alates 1969. aastast ka Balti regionaalne stratigraafia komisjon. Riiklikult finantseeritud uuringud töid maapõuest hulgaliselt uut materjali ja andmeid stratigraafilise liigestuse täpsustamiseks ning kihtide korreleerimiseks nii naabermaade kui kaugemate regioonidega. Puursüdamike uurimisel hakati siis laialdaselt kasutama mikrofossiilidel põhinevat biostratigraafiat, samuti erinevaid geofüüsikalisi meetodeid. Ametlikud regionaalsed stratigraafilised skeemid koos seletuskirjadega kinnitati aastatel 1962, 1976 ja 1984 (Resheniya... 1965, 1978, 1987). Nende järk-järgulisel edasiarendamisel oleme jõudnud Eesti maapõue tänapäevase stratigraafilise liigestuseni.

Taasiseseisvumise perioodil alustas tegevust **Eesti Stratigraafia Komisjon (ESK)** ning varasema töö jätkamiseks asutati koos Läti ja Leedu komisjonidega 1990. aastal Balti Stratigraafia Assotsiatsioon, mis korraldab tänaseni perioodilisi Balti stratigraafia konverentse. Neist viimane, 11. konverents toimus 2024. a augustis Eestis (Hints jt, 2024; <https://stratigraafia.info/11bsc>).

1990ndatel võeti Eestis, nagu ka Lätis ja Leedus, vastu otsus lähtuda edaspidi Rahvusvahelisest Stratigraafia Juhisest (*International Stratigraphic Guide*) ning loobuda NSVLi stratigraafia koodeksi järgimisest. Päris lahti pole me nõukogude pärandist siiski saanud ning mitmeid jäänukeid leiab ka tänastest stratigraafilistest skeemidest. Näiteks litostratigraafiliste kivimikehade (kihistute) paigutamine ajalistesse raamidesse (lademetesse) ning samade nimede kasutamine eritüübiliste üksuste puhul (nt Jaagarahu

kihistu ja Jaagarahu lade). Rahvusvaheliste reeglite ja praktika järgi on erinevate tunnuste alusel defineeritud stratigraafilised üksused üksteisest sõltumatud ning nende piirid ei pea kokku langema. Samuti on üksteisest sõltumatud ka erineva geograafilise skoobiga üksused ning seetõttu ei lange üldjuhul kokku ka regionaalsete ja globaalsete lademet piirid.

Eesti Stratigraafia Komisjon tegutseb alates 2002. aastast Eesti Geoloogia Seltsi egiidi all ning seltsi volikogu on kinnitanud ESK põhimääruse ning koosseisu. Täpselt samamoodi on see kujunenud ka Lätis ja Leedus, kuid nt Rootsis on stratigraafilise terminoloogia komisjon Teaduste Akadeemia all ning Soomes geoloogia rahvuskomitee allüksuseks.

ESK koondab täna eksperte Eesti Geoloogiateenistusest, Tartu Ülikoolist, Tallinna Tehnikaülikoolist ja Maa-ametist. 2023. aastal uuendatud põhimääruse järgi on ESK olulisemateks ülesanneteks: (1) varustada geolooge ja teisi huvigruppe stratigraafiat käsitleva teabega, korrastada eestikeelset terminoloogiat ja klassifikatsiooni ning koostada Eesti maapõue iseloomustamiseks sobivad stratigraafilised skeemid, arvestades arenguid naabermaades ja globaalselt; (2) koondada informatsiooni Eestis kasutatavate stratigraafiliste üksuste ja nende tüüpläbilõigete kohta ning teha see kõigile kättesaadavaks; (3) rakendada ja propageerida asjakohast stratigraafilist liigestust ja terminoloogiat, ning (4) arendada rahvusvahelist koostööd.

Selle kõigega on ESK läbi oma liikmete viimastel aastakümnetel ka tegelenud. Stratigraafilise teabe vahendamiseks on kujunenud komisjoni koduleht aadressil <https://stratigraafia.info>. Seal on kättesaadavad viimased teadlaste poolt koostatud stratigraafilised skeemid, terminoloogia ja printsiipide käsiraamat, stratigraafiliste üksuste register, perioodiliselt uuendatav rahvusvaheline ajaskaala (geokronoloogiline tabel) ning viited naaberriikide stratigraafilisele teabele ja globaalsetele infoallikatele. Kõik Eesti stratigraafia alased trükised on leitavad Geokirjanduse portaalist (<https://kirjandus.geoloogia.info>), suur osa neist ka digiteeritud kujul. Lisaks on palju stratigraafilise sisuga infot vabalt kättesaadav eMaapõue portaalis (<https://geoloogia.info>) ning Geoloogiafondis (<https://fond.egt.ee>). ESK algatatud projekti raames on dokumenteeritud ja hinnatud stratotüüpsete paljandite seisukorda ning loodud eraldi portaal vastava info vahendamiseks (<https://stratotuup.ut.ee>).

Rahvusvahelises plaanis on lisaks Balti riikide koostööle oluline mainida Eesti teadlaste osalemist IUGSi Rahvusvahelise Stratigraafia Komisjoni (ICS,

<https://stratigraphy.org>) tegevuses, seda eriti Ordoviitsiumi ja Siluri alamkomisjonides. Nende ladestute-ajastute poolest on Eesti maailmas kõige paremini tuntud ja seal on meie geoloogidel ka kõige rohkem kaasa rääkida. Viimasel veerandsajandil oleme maailmas silma paistnud süsiniku stabiilsetel isotoopidel ($\delta^{13}\text{C}$) baseeruva kemostratigraafia (Ainsaar jt, 2010; Kaljo ja Martma, 2006 jpt), tefrostratigraafia (Kiipli jt, 2010 jpt) ning detailise biostratigraafia arendustega (nt Männik, 2007; Nestor, 2012; Goldman jt, 2015).

Eesti stratigraafilise liigestuse suunal saab samuti esile tõsta mitmeid arenguid. Esmakordselt on Ediacara, Kambriumi, Ordoviitsiumi ja Siluri litostratigraafilised üksused paigutatud regulaarsesse ajaskaalasse (skeemid ja viited vt Meidla, 2024; Meidla jt, 2024; Männik jt, 2024), uuendatud on Ordoviitsiumi regionaalset korrelatsiooniskeemi (Meidla jt, 2023), ilmunud on põhjalik ülevaade Holotseeni stratigraafiast (Hang jt, 2020), valmimas on kokkuvõtte Siluri stratigraafia arengutest ning Devoni ja aluskorra uuendatud skeemid.

Samas ei ole puudust ka uutest stratigraafia-alastest väljakutsetest nii teadlastele kui praktikutele. Geoloogid-kaardistajad näevad vaeva, et seni laialt kasutatud stratigraafilisi üksusi täpsemalt piiritleda ja läbilõigetes ära tunda. Varasema andmestiku koondamine ja analüüs on näidanud, et mitmete üksuste puhul ei ole senine kasutus olnud järjekindel ning teadmised meie maapõue liigestuse kohta on lünklikud või lausa ekslikud. On selge, et paljud üksused vajavad revisjoni ning senisest selgemat defineerimist või kasutamisest loobumist. Küsimusi on ka üldisemat laadi: näiteks, milliseks kujuneb tulevikus meie aluspõhja regionaalsete lademetest staatus ja tähendus? Kas on otstarbekas nende võimalikult täpne defineerimine lähtudes rahvusvahelistest reeglitest (nn kuldse naela printsiip piiristatootüübis), või jääb Eesti aluspõhja lademilise liigestuse põhirolliks ajaloolise järjepidevuse tagamine ning parimat ajalist taustsüsteemi pakub kvantitatiivse bio- ja kemostratigraafia ning astrokronoloogia süntees?

Üks on siiski selge: vajadus stratigraafia-alaste teadmiste järele ei ole sajandite jooksul kadunud ning lisaks Eesti maapõue digitaalse kaksiku loomisele vajame jätkuvalt ka rahvusvahelisel tasemel stratigraafia-alast teadustööd ning stratigraafia õpetamist ülikoolides.

Kasutatud kirjandus

- Ainsaar, L., Kaljo, D., Martma, T., Meidla, T., Männik, P., Nõlvak, J., Tinn, O. 2010. Middle and Upper Ordovician carbon isotope chemostratigraphy in Baltoscandia: a correlation standard and clues to environmental history. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 294, 189–201.
- Engelhardt, M. von 1820. Zur Geognosie. Darstellungen aus dem Felsgebäude Russlands. Erste Lieferung (=Alles Erschienene): Geognostischer Umriss von Finland. Reimer, Berlin.
- Goldman, D., Nõlvak, J., Maletz, J. 2015. Middle to Late Ordovician graptolite and chitinozoan biostratigraphy of the Kandava-25 drill core in western Latvia. *GFF*, 137, 197–211.
- Hang, T., Veski, S., Vassiljev, J., Poska, A., Kriiska, A., Heinsalu, A. 2020. A new formal subdivision of the Holocene Series/Epoch in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 69, 269–280.
- Hints, O., Männik, P., Toom, U. (toim). 2024. XI Baltic Stratigraphical Conference. Abstracts and Field Guide. Geological Society of Estonia, Tallinn, 156 lk.
- Kaljo, D., Martma, T. 2006. Application of carbon isotope stratigraphy to dating the Baltic Silurian rocks. *GFF*, 128, 123–129.
- Kiipli, T., Kallaste, T., Nestor, V. 2010. Composition and correlation of volcanic ash beds of Silurian age from the eastern Baltic. *Geological Magazine*, 147, 895–909.
- Meidla, T. 2024. Ediacaran and Cambrian stratigraphy in Estonia. In XI Baltic Stratigraphical Conference. Abstracts and Field Guide. Geological Society of Estonia, Tallinn, 51–53.
- Meidla, T., Ainsaar, L., Hints, O. 2024. The Ordovician System in Estonia. In XI Baltic Stratigraphical Conference. Abstracts and Field Guide. Geological Society of Estonia, Tallinn, 54–59.
- Meidla, T., Ainsaar, L., Hints, O., Radzevičius, S. 2023. Ordovician of the Eastern Baltic palaeobasin and the Tornquist Sea margin of Baltica. *A Global Synthesis of the Ordovician System: Part 1*, Geological Society, London, Special Publications, 532, 317–343.
- Männik, P. 2007. Recent developments in the Upper Ordovician and lower Silurian conodont biostratigraphy in Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 56, 35–46.
- Männik, P., Meidla, T., Hints, O. 2024. The Silurian System in Estonia. In XI Baltic Stratigraphical Conference. Abstracts and Field Guide. Geological Society of Estonia, Tallinn, 60–64.
- Nestor, V. 2012. A summary and revision of the East Baltic Silurian chitinozoan biozonation. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 61, 242–260.
- Resheniya... 1965. Решения межведомственного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем верхнего докембрия и палеозоя Русской платформы 1962 г. Leningrad.
- Resheniya... 1978. Решения межведомственного регионального стратиграфического совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем Прибалтики 1976 г. Litovski NIGRII, Leningrad.
- Resheniya... 1987. Решения Межведомственного стратиграфического совещания по ордовики и силуру Восточно-Европейской платформы 1984 г. с региональными стратиграфическими схемами. Leningrad.
- Schmidt, F. 1858. Untersuchungen über die Silurische Formation von Ehstland,

Nord-Livland und Oesel. Archiv für die Naturkunde Liv-, Ehst- und Kurlands, 2, 1–249.

Schmidt, F. V. 1879. Взгляд на новейшее состояние наших познаний о силурийской системе С.-Петербургской и Эстляндской губерний и острова Эзеля. Труды Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей, 10, 42–48.

Severgin, V. M. 1808. Известие о Ревельской дымящейся горе. Технологический журнал, 5, 157–169.

Strangways, W. T. H. F. 1821. Geological Sketch of the Environs of Petersburg. Transactions of the Geological Society of London, 5, 392–458.

Strangways, W. T. H. F. 1822. An outline of the Geology of Russia. Transactions of the Geological Society of London, 1, 1–39.

MEREVEE TASEME JA RANNAJOONE PÄRASTJÄÄAEGSETE MUUTUSTE UURINGUTEST LÄÄNEMERE IDAOSAS

Alar Rosentau

Tartu Ülikooli geoloogia osakond, rakendusgeoloogia professor
alar.rosentau@ut.ee

Merevee tase ja sellega koos ka rannavöönd on Läänemere piirkonnas teinud pärastjääajal läbi suuri muutusi, millega on kaasnenud esiajaloolise asustuse nihkumine kord mere, kord maismaa poole. Nende muutuste taga on Skandinaavia mandriliustiku sulamine ja sellest tingitud pärastjääaegne maatõus ning veetaseme muutused maailmameres. Setetesse ja pinnavormidesse talletunud info võimaldab neid muutusi uurida, et selgitada välja seoseid kliimasündmuste, jääkilpide sulamise ja merevee taseme tõusu vahel. Viimaste aastate uuringud Läänemere idaosas on andnud uusi teadmisi nii merevee taseme muutuste, kui ka esiajaloolise asustuse paiknemise kohta. III Geoloogia Sügiskoolis arutlesime koos arheoloog Aivar Kriiska ja geograaf Raivo Aunapiga erinevate võimaluste üle Läänemere rannajoonte modelleerimisel (Rosentau jt, 2007). Antud lühiartikkel lõppes tõdemusega vajadusest uute andmete kogumise ja interpreteerimise järele: „Lähiaastatel planeeritakse koguda uut andmestikku Läänemere veetaseme muutuste kohta ning viia läbi modelleerimiseksperimente, loomaks ajalis-ruumiline veetaseme ning rannajoone muutuste mudel.“ Vahepealsete aastate jooksul on tõesti neid uusi andmeid kogutud ning läbi viidud erinevaid modelleerimiseksperimente, millest tuleb ka järgnevalt juttu.

Läänemere arenguloo kõige varasema etapi - Balti Jääpaisjärve perioodi rannajoonte GIS-i põhised mudelid on andnud uut teadmist jääpaisjärve veetaseme muutuste ning ühenduste kohta idas paiknenud jääpaisjärvedega (Saarse *et al.*, 2007; Rosentau *et al.*, 2009). Pisut hiljem töötasime välja meetodika, mis võimaldas geoloogiliste- ja reljeefandmete alusel modelleerida vastavalt arheoloogilistele vanustele paleorannajooni (Rosentau *et al.*, 2011). See võimaldas omakorda uurida esiajaloolise asustuse paiknemist tollase ranniku, laguunide ja jõesuudmete suhtes. Järgnevate uuringute tulemusena selgusid Litoriinamere laguuni areng ja seosed laguuni rannavööndis paiknenud kiviaja asulakohtadega

Narva-Lauga piirkonnas (Rosentau et al., 2013), Tallinna vanima kiviaegse asulakoha paleogeograafia (Muru et al., 2017), Ruhnu saare (Muru et al., 2018), Rannametsa-Tolkuse (Habicht et al., 2017), Pärnu piirkonna (Nirgi et al., 2020), Hiiumaa ja Saaremaa (Rosentau et al., 2020) ning Kolka piirkonna (Rosentau et al., 2023) kiviaegne asustumusmuster ja muutused tollastes maastikes. Saaremaal on lisaks kiviaegsele asustusele olnud fookuses ka pronksi- (Nirgi et al., 2017) ja viikingiaegsed (Nirgi et al., 2022) rannavööndi muutused. Paleogeograafiliste rekonstruktsioonide koostamisel on edasi arendatud meetodikaid nooremate setete ja pinnavormide lahutamisel kõrgusmudelitest ning üle on mindud LiDAR kõrgusandmete kasutamisele (Habicht et al., 2017; Muru et al., 2017). Arheoloogilisi asukohamudeleid on rakendatud Eesti kivijaja küttide-korilaste ja maaviljelejate paiknemismustrite uurimisel (Sikk et al., 2022) ning kasutusele on tulnud GIA ehk glatsioisostaatilise tasakaalustumise mudelite kasutamine meretaseme muutuste prognoosimisel (Rosentau et al., 2021). Nende meetodikate tutvustamiseks on aastatel 2010, 2012, 2013 ja 2017 toimunud ka rahvusvahelised doktorikooli kursused.

Eesti meretaseme muutuste andmestik on koos teiste Läänemere nõo eri piirkondade andmetega koondatud ühtsesse andmebaasi, sisaldades üle 1300 merevee taseme kõrgust ja meretaseme trendi kirjeldava vanusemääranguga andmepunkti (Rosentau et al., 2021). See andmestik võimaldab uurida merevee taseme muutuste ajalis-ruumilisi mustreid Holotseenis ja kalibreerida GIA mudeleid, võimaldades sellega nii paleorekonstruktsioonide kui ka merevee taseme tulevikumuutuste stsenaariumite koostamist. Andmetest joonistuvad välja kolm erinevat Läänemere regiooni, kus merevee tase viimase merelise staadiumi jooksul peamiselt kas alaneb, tõuseb või kus meretaseme muutus on kompleksne. Viimast tüüpi on merevee taseme muutused ka Eesti rannikualadel, kus maailmamere veetaseme tõusu aeglustumisel ligi 7000 aastat tagasi asendus meretaseme tõus langustrendiga. Meretaseme tõusu algfaasis ja ka vahetult sellele eelneval perioodil ligi 9000-8500 aastat tagasi oli mitmel pool aeglase maatumisega piirkondades, sh Pärnu ja Hanö lahes, merevee tase tänapäevasest madalam, nii et osa meie esiajaloolistest maastikest ja võib-olla ka (veel uurimata) kultuuripärandist on nüüdseks jäänud mere põhja. Pärnu lahes annab sellest tunnistust Pärnu jõe vana sängi esinemine lahe põhjas, mis on rannapoolses osas mattunud nooremate mereliivade alla (Nirgi et al., 2020). Viimased uuringud näitavad, et lahe sügavamas osas avaneb kunagine säng ka merepõhjas, avades seal uusi võimalusi veeluse

esiajaloolise kultuuripärandi leidmiseks. Transgressiooni tulemusena tõusis meretase Pärnu piirkonnas tänasest uuesti kõrgemale ujutades üle omaaegsed rannikumaastikud, aga ka rannikul paiknenud mesoliitilised asulakohad.

Lisaks teadusartiklites avaldatud tulemustele merevee taseme ja rannavööndi muutuste kohta pärastjääajal, on TÜ ökoloogia ja maateaduste instituudis kaitstud ka mitmeid teemakohaseid magistri- ja doktoritöid. Annike Veske (2009) uuris oma magistritöös Litoriinamere transgressiooni mõju Pärnu madalikul, Kairi Hõlpus (2010) jääpaisjärvede arengut, Birgit Kuningas (2010) Holotseeni rannamoodustisi Narva-Jõesuus, Hanna Raig (2012) Tõrvajõe laguuni arengut, Hando-Laur Habicht (2014) Antsülusjärve ja Litoriinamere paleogeograafiat Tolkuse-Rannametsa piirkonnas, Stefan Bjursäter (2015) Rannametsa rannamoodustiste kujunemist ja vanust ning Art Kristjan Olesk (2024) üleujutatud rannikumaastikke Pärnu lahes. Paleogeograafiliste rekonstruktsioonide metoodikaid arendas oma doktoritöös Merle Muru (2017) ja uued meretaseme muutuste rekonstruktsioonid esitas oma doktoritöös Triine Nirgi (2020).

Kasutatud kirjandus

- Bjursäter, S. 2015. Luminescence based chronology of the postglacial coastal development in the Pärnu region, south-western Estonia. *Magistritöö*. Stockholmi Ülikool. Juh. Frank Preusser, Jan Risberg, Alar Rosentau.
- Habicht, H., Rosentau, A., Jõelet, A., Heinsalu, A., Kriiska, A., Kohv, M., Hang, T. & Aunap, R. 2017. GIS-based multiproxy coastline reconstruction of the eastern Gulf of Riga, Baltic Sea, during the Stone Age. *Boreas*, 46 (1), 83–99.
- Habicht, H.-L. 2014. Antsülusjärve ja Litoriinamere paleogeograafia Tolkuse-Rannametsa piirkonnas setete ja aerolaserskanneerimise kõrgusandmete alusel. Tü geograafia osakond. Juh. Raivo Aunap, Alar Rosentau.
- Hõlpus, K., 2010. Jääpaisjärvede rannavööndi muutused Narva-Luuga piirkonnas. *Magistritöö*. Tü geoloogia osakond. Juh. Alar Rosentau.
- Kuningas, B. 2010. Kõrgusmudeli kasutamine Holotseeni rannamoodustiste morfogeneesi uurimisel Narva-Jõesuu piirkonnas. *Magistritöö*. Tü geograafia osakond. Juh. Raivo Aunap, Alar Rosentau.
- Muru, M. 2017. GIS-based palaeogeographical reconstructions of the Baltic Sea shores in Estonia and adjoining areas during the Stone Age. *Dissertationes Geographicae Universitatis Tartuensis*, 64. Tü ökoloogia ja maateaduste instituut. Juh. Raivo Aunap, Alar Rosentau.
- Muru, M., Rosentau, A., Preusser, F., Plado, J., Sibul, I, Jõelet, A., Bjursäter, S., Aunap, R. & Kriiska, A. 2018. Reconstructing Holocene shore displacement and Stone Age palaeogeography from a foredune sequence on Ruhnu Island, Gulf of Riga, Baltic Sea. *Geomorphology*, 303, 434–445.
- Muru, M., Rosentau, A., Kriiska, A., Lõugas, L., Kadakas, U., Vassiljev, J., Saarse, L., Aunap, R., Küttim, L., Puusepp, L. & Kihno, K. 2017. Sea level changes and Neolithic hunter-fisher-gatherers in the centre of Tallinn, southern coast of the Gulf of Finland, Baltic Sea. *The Holocene*, 27 (7), 917–928.
- Nirgi, T., Grudzinska, I., Kalinska, E., Konsa, M., Jõelet, A., Alexanderson, H., Hang, T. & Rosentau, A. 2021. Late Holocene relative sea-level changes and palaeoenvironment of the Pre-Viking Age ship burials in Salme, Saaremaa Island, eastern Baltic Sea. *The Holocene*, 32 (4), 237–253.
- Nirgi, T. 2020. Holocene relative shore-level changes and geoarchaeology of the prehistoric sites in western Estonia. *Dissertationes Geologicae Universitatis Tartuensis*, 46. Tü ökoloogia ja maateaduste instituut. Juh. Alar Rosentau, Tiit Hang.
- Nirgi, T., Rosentau, A., Habicht, H.-L., Hang, T., Jonuks, T., Jõelet, A., Kihno, K., Kriiska, A., Mustasaar, M., Risberg, J., Suuroja, S., Talviste, P. & Tõnisson, H. 2020. Holocene relative shore-level changes and Stone Age palaeogeography of the Pärnu Bay area, eastern Baltic Sea. *The Holocene*, 30 (1), 37–52.
- Nirgi, T., Rosentau, A., Ots, M., Vahur, S. & Kriiska, A. 2017. Buried Amber Finds in the Coastal Deposits of Saaremaa Island, Eastern Baltic Sea – Their Sedimentary Environment and Possible Use by Bronze Age Islanders. *Boreas*, 46 (4), 725–736.
- Olesk, K. 2024. Üleujutatud Holotseeni rannikumaastikud Pärnu lahes. Tü geoloogia osakond. *Magistritöö*. Tü geoloogia osakond. Juh. Alar Rosentau, Tiit Hang, Sten Suuroja.
- Raig, H. 2012. Tõrvajõe nõo pärajääaegne arengulugu ja seosed kiviaegse

asustusega Narva-Luuga klindilahes. Magistritöö. TÜ geoloogia osakond. Juh. Alar Rosentau.

Rosentau, A., Grudzinska, I., Kalinska, E., Alexanderson, H., Berzins, V., Cerina, A., Kalnina, L., Karuss, J., Lamsters, K., Muru, M., Nartiss, M., Papparde, L. & Hang, T. 2023. Holocene relative shore-level changes and development of the Gipka lagoon in the western Gulf of Riga. *Boreas*, 52 (4), 517–537.

Rosentau, A., Klemann, V., Bennike, O., Steffen, H., et al., 2021. A Holocene relative sealevel database for the Baltic Sea. *Quat. Sci. Rev.* 266, 107071.

Rosentau, A., Nirgi, T., Muru, M., Bjursäter, S., Hang, T., Preusser, F., Risberg, J., Sohar, K., Tõnisson, H. & Kriiska, A. 2020. Holocene relative shore level changes and Stone Age hunter-gatherers in Hiiumaa Island, eastern Baltic Sea. *Boreas*, 49 (4), 783–798.

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, 912–931.

Rosentau, A., Veski, S., Kriiska, A., Aunap, R., Vassiljev, J., Saarse, L., Hang, T., Heinsalu, A. & Oja, T. 2011. Palaeogeographic model for the SW Estonian coastal zone of the Baltic Sea. Harff, Jan; Björck, Svante; Hoth, Peer (Toim.). *The Baltic Sea Basin*. Springer, lk 165–188

Rosentau, A., Vassiljev, J., Hang, T., Saarse, L. & Kalm, V. 2009. Development of the Baltic Ice Lake in eastern Baltic. *Quaternary International*, 206, 1–23.

Rosentau, A., Kriiska, A., Aunap, R. 2007. Võimalusi Läänemere paleo-rannajoonte modelleerimiseks. Rmt.: Verš E. ja Amon L. (toim.) *Mudelid ja modelleerimine*. *Schola Geologica* 3, lk. 62–65.

Saarse, L., Vassiljev, J. & Rosentau, A. 2009. Ancyclus Lake and Litorina Sea transition on the Island of Saaremaa, Estonia: a pilot study. *Baltica*, 22(1), 51–62.

Sikk, K., Caruso, G., Rosentau, A. & Kriiska, A. 2022. Comparing contemporaneous hunter-gatherer and early agrarian settlement systems with spatial point process models: Case study of the Estonian Stone Age. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 41, 103330.

Veske, A. 2009. Litoriniamere transgressioon ja rannavööndi muutused Pärnu madalikul. Magistritöö. TÜ geoloogia osakond. Juh. Alar Rosentau.

EESTI GEOLOOGIATEENISTUS

GEOLOOGILISTE ANDMETE SÄILITAJANA

Ants Vain

Eesti Geoloogiateenistus, geoinformatsiooni osakond, GIS peaspetsialist
ants.vain@egt.ee

Eesti Geoloogiateenistus (EGT) on viimastel aastatel kujundanud ümber oma andmebaasi, et oleks võimalik erinevate tegevusvaldkondade andmeid sinna talletada. Õigemini öeldes laiendati märgatavalt olemasolevat andmebaasi ning tekitati juurde mitu uut. Varasemalt oli andmebaas rohkem geoloogilise kaardistamise keskne, uues laiendatud baasis kaetakse meregeoloogia, seismoloogia, radoonimõõtmiste, hüdroteoloogia ja maapõue uuringute vajadused. Näiteks tekivad EGTs andmed puuraukude geofüüsikaliste sondeerimiste või merel tehtavate geofüüsikaliste profileerimiste kohta, mida varem polnud võimalik andmebaasi salvestada. Uue puursüdamiku skänneri tulekuga on tekkinud vajadus seal tekkivaid andmeid talletada ja avalikkusega jagada, samuti on toimunud puursüdamike kastide üle pildistamised. See kõik eeldab, et uus andmemudel võimaldaks taolisi andmeid andmebaasi talletada. Baasidesse on sisse viidud ka mitmeid kvaliteedikontrolle ning klassifikaatoreid, mis peaksid vältima ebaõigete ja -loogiliste andmete jõudmist andmebaasi, tõstes seeläbi andmekvaliteeti.

Lisaks laiendatud baasi(de)le, arendati välja ka erinevad avalikkusele suunatud teenused. Üle x-tee on võimalik pärida stratigraafia klassifikaatorite väärtuseid, REST API kaudu on võimalik leida infot puuraukude, puursüdamike, geoloogiliste kirjelduste, proovide, analüüside jpm kohta. Lisaks pakutakse OGC standardile vastavaid WMS ja WFS teenuseid 1 : 200 000 geoloogilise kaardi, puuraukude ja vaatluspunktide ning seismiliste sündmuste kohta.



TARTU ÜLIKOOL

geoloogia osakond



TARTU ÜLIKOOL

ökoloogia ja maateaduste
instituut



Eesti
Teadusagentuur

QÜS

GEOTEADUSTE ÜLIÕPILASTE SELTS