

Tartu Ülikool  
Humanitaarteaduste ja kunstide valdkond  
Ajaloo ja arheoloogia instituut  
Arheoloogia osakond

Sander Jegorov  
**EESTI ARHEOLOOGILISE RAUA PÄRITOLUANALÜÜS**  
**Magistritöö**

Juhendaja: PhD, Ragnar Saage

Tartu 2023

# Sisukord

Sissejuhatus .....	3
<b>1. Ülevaade rauasulatusest ja selle uurimisest .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Uurimislugu.....</b>	<b>6</b>
1.1.1 Rauasulatuskohtade uurimine .....	6
1.1.2 Metallograafilised uuringud.....	7
1.1.3 Eksperimentaalarheoloogia.....	9
1.1.4 Päritoluanalüüsid .....	9
<b>1.2 Ajalooline taust .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Rauamaak .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Rauasulatusprotsess .....</b>	<b>15</b>
1.4.1 Rauasulatusahjud.....	17
1.4.1.1 Varased ahjud .....	17
1.4.1.2 Hilised ahjud.....	19
<b>2. Materjal .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Šlakk .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Kaubatoorikud.....</b>	<b>24</b>
<b>3. Teooria ja meetod .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Proovide kontekst .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Proovide ettevalmistus .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 SEM-EDS .....</b>	<b>36</b>
3.3.1 SEM-EDS sätted.....	36
<b>3.4 LA-ICP-MS .....</b>	<b>36</b>
3.4.1 LA-ICP-MS sätted.....	37
<b>3.5 Andmeanalüüs .....</b>	<b>38</b>
<b>4. Tulemused .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1 Mikrostruktuur.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2 PCA.....</b>	<b>42</b>
4.2.1 Alusjoon .....	42
4.2.2 Alusjoone rakendamine .....	45
<b>5. Arutelu.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1 Rauasulatusšlaki keemilise koostise seos geoloogilise aluspõhjaga .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2 Kaubatoorikute seosed rauasulatusšlakkidega .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3 Eestisisene või -väline kaubavahetus?.....</b>	<b>56</b>
<b>Kokkuvõte .....</b>	<b>60</b>
<b>Kasutatud kirjandus .....</b>	<b>63</b>
<b>Käsikirjad.....</b>	<b>63</b>
<b>Publikatsioonid .....</b>	<b>63</b>
<b>Summary: Provenance analysis of Estonian archaeological iron.....</b>	<b>73</b>

## Sissejuhatus

Raua kasutuselevõtt on olnud maailma mastaabis üks suurimaid ja olulisemaid samme, mis on viinud mitmete uute innovatsioonide tekkimiseni. Tegemist oli enne industrialiseerimist majanduses ühe peamise kasutatava materjaliga (Charlton et al. 2012, 2280), mida väärtustati väga kõrgelt. Läbi mitmete arheoloogiliste leidude on nähtav, kuidas raua kasutuselevõttuga on see saavutanud kiirelt prestiižeseme staatuse (Pleiner 2000, 20), mis küll aja jooksul vaibus, muutudes rohkem tarbeesemelikumaks (Loftsgarden 2019, 76). Rauda seostatakse ka maagiaga, mida on kirjeldatud mitmetes etnograafilistes materjalides (Peets 2003, 151–152) ja mis kinnitab raua ja rauatöö kõrget staatust. Oluline roll on raual olnud ka kaubanduses, millele viitavad võõra päritoluga esemetüübid, nagu näiteks eelroomarauaaegsed silmaga kirved (Jaanits 1982, 190–191). Osade leiude, nagu kaubatoorikute valmistamiskoht, jääb aga määramatuks, mis viis ka magistritöö teema püstitamiseni.

Raua ja šlaki päritoluuuringuid Eestis läbi viidud pole. Selle asemel on käsitatud muid materjale – nimelt, analüüse on teostatud tulekivi- (Johanson et al. 2021) ja inimluude strontsiiumi isotoopidest (Price et al. 2020). Seda ei saa võrrelda muu Euroopaga, kus on aastate jooksul üritatud töötada välja aina paremaid meetodeid, kuidas viia raua päritoluanalüüse täpsemaks ja korrektsemaks (nt Birch 2013, Żabiński et al. 2020). Modernsetele päritoluuuringutele pandi alus Devos et al. 2000 töös, mis on esimene, kus kasutati ka LA-ICP-MS-i keemilise koostise uuringutel, et eristada jälgelemente. Tänavu on jõutud analüüsidega mitmete nüanssideni, mida varasemalt ei rakendatud. Näiteks on käsitluses andmeanalüüsimeetodid, millega on võimalik luua gruppe keemilise koostise hierarhilisuse baasil (Żabiński et al. 2020). Selle abil on tuvastatavad nn „rauasulatusüsteemid,“ mida määravad ühes kohas läbivalt kasutatud sarnased rauasulatusingimused (nt Blakelock et al. 2009, 46; Birch, Torres 2015, 74; Birch 2018, 267) ja mis peegeldub šlaki keemilises koostises.

Käesoleva töö eesmärgiks on luua alusjoon Eesti rauasulatusšlakkide keemilise koostisesse kuuluvatest makro- ja jälgelementidest. Tegemist on rakendatava andmestiku visualiseerimise viisiga, millele saab lisada raudesemeid ja uurida selle läbi keemilise kompositsiooni sarnasuste abil nii raua kohalikku tootmist, kui ka

võimalikke kaubandus- ja vahetusvõrgustikke, mis Eestis toimida võisid. Siinpuhul lisatakse alusjoonele kaubatoorikuid, mida arvatavasti kasutati edasimüümiseks (Saage et al. 2022, 66).

Töö olulisus seisneb selles, et tegemist on esimese raua ja šlaki päritolu uuriva tööga, mis on Eestis läbi viidud. Loodava rauasulatusšlakide alusjoone järgi on võimalik paigutada erinevaid raudesemeid töös valminud graafikutele. Nende abil tekib võimalus esemetes leiduvaid šlakipesi hakata laialdasemalt rakendama keemilisteks analüüsideks ja uurida, kust on tegelikult pärit Eestist avastatud arheoloogilised raudesemed.

Materjalina kasutati Eesti rauasulatuskohtadest pärit šlakki ja juhuleidudena avastatud kaubatoorikuid. Peale nende on valimis ka üks rauakang ja Rootsist pärit osmundi raud. Viimast kasutatakse kontrollproovina, kuna kõrgahjus toodetud raua šlakipesad ei tohiks anda adekvaatseid tulemusi (Lauridsen et al. 2023, 191), arvatavasti oma heterogeensuse tõttu. Suur osa šlaki- ja toorrauaproovidest andis uurimiseks Jüri Peets, kes oli varasemalt oma publikatsioonides neid juba keemiliselt analüüsinud (Peets 1991, Peets 2003).

Uurimisküsimused on järgmised:

1. Millised erinevused esinevad erinevate Eesti piirkondade rauasulatusšlaki keemilises koostises?
2. Kas keemilise koostise järgi on võimalik eristada kohalikke rauasulatusüsteeme?
3. Kas on võimalik kaubatoorikutes esinevate šlakipesade keemilise koostise järgi jälgida kaubandussuhteid?
4. Kas otsetaandamise teel toodetud raua šlaki keemilises koostises leidub sarnasusi kõrgahjus toodetud raua šlakiga?

Esimene peatükk annab ülevaate uurimisloost Eestis ja lähiriikides ja täpsemalt tuuakse välja päritoluanalüüsides areng uurimisloos vältel. Peale selle käsitletakse rauasulatussega seotud tausta – kust tehnoloogia levis, mida toormaterjalina on kasutatud ja millistes ahjudes rauasulatus toimus. Peale Eesti avatakse ka Skandinaavia- ja Baltimaade, Soome ning osati ka Lääne-Venemaa materjali, kuna

tegemist on Läänemere ruumis üksteisega seotud aladega. Teine peatükk käsitleb kasutatud materjali – šlakki ja kaubatoorikuid ning arutletakse probleemide üle, mis nende uuringutega kaasnevad. Kolmandas peatükis räägitakse lähemalt kasutatud meetoditest ja proovide ettevalmistusest. Neljandas peatükis esitletakse tulemused nii mikrostruktuuri-, kui ka põhikomponendianalüüsi kohta ja peatutakse pikemalt erinevate graafikute peal. Viiendas peatükis toimub arutelu saadud tulemuste üle, diskuteeritakse rauasulatusšlaki ja kaubatoorikute seostest geoloogilise aluspõhjaga ja päritolu- ning kaubanduse üle.

Töös kasutatud SEM-EDS fotod šlakipesade proovistatud aladest, R-i koodi failid ja graafikud säilitatakse digiarhiivina DSpaces, et meetod oleks kontrollitav ja taasloodav.

Kõige suuremad tänusõnad lähevad töö juhendajale, Ragnar Saagele, kes terve tööprotsessi vältel pakkus suurepäraseid ideid ja aitas pidevalt teksti valmimisele. Kindlasti ei saa mainimata jätta Tartu Ülikooli geolooge – kõigepealt mu bakalaureusetöö kaasjuhendajat, Peeter Somelari ja Mariann Külaviirt, kes olid SEM analüüside teostamisel asendamatud, kuid ka Päärn Paistet, kes aitas viimaste laserablatsiooni proovidega. Oluline osa oli ka Kalle Kirsimäel, tänu kellele sai jala ukse vahele vajalike meetodite kasutamiseks. Väga suur roll oli ka võõrleegionäridel Taanist – Thomas Birchil, kes oli mentoriks päritoluanalüüside ja andmetöötamise osas ning Rasmus Andreassenil, kes oma piiramatute laserablatsiooniteadmistega panustas töö valmimisse. Lõppudelõpuks tänud ka Jüri Peetsile, kes oma materjali lahkelt jagas ja lihtsustas sellega suurel määral selle otsimist.

# 1. Ülevaade rauasulatusesest ja selle uurimisest

## 1.1 Uurimislugu

### 1.1.1 Rauasulatuskohtade uurimine

Eestis esimeste rauasulatuskohtade uuringutega tegi algust 1962. aastal Aita Kustin (Peets 2003, 104). Kustin viis sel aastal läbi väljakaevamised Saaremaal, Tuius ja hiljem, 1969. aastal Tõrisel (Mäesalu, Valk 2006, 145). Varaseid rauasulatuskohti suudeti eristati juba 1965. aastal, Raes ja Jüris. Vello Lõugase juhitud proovikaevamiste käigus leiti rauasulatusahjude põhjad, šlakki ja savinõukilde. Kompleks dateeriti eelrooma rauaaja lõppu (Lang 2006, 94). 1980. ja 1990. aastaid on valdavalt domineerinud Jüri Peetsi ettevõtmised. Peets alustas 1986 enda ühte suurimat projekti – Tuiu, kus ta kaevamiste tulemusena järeldas, et rauda toodeti piirkonnas massiliselt 12.–14. sajandini (Mäesalu, Valk 2006, 145). Peale selle on Peets veel 1996 kaevanud Tindimurru-, hiljem Puiato rauasulatuskohta (Lang 2006, 94; Tvauri, 2006, 117–118) ja palju muid. Kogu info Peetsi kaevatud rauasulatuskohtade kohta koondati tema 2003 ilmunud monograafiasse (Peets 2003). Järgmine uuring tuli alles 2007. aastal, kus eeluuringute käigus avastas Mauri Kiudsoo Tõdvast 2 ahju (Kiudsoo et al. 2009, 98). 2012 aasta seisuga oli uuritud kokku 8 esimese aastatuhande esimese poole rauasulatuskohta (Peets 2012, 34).

Skandinaavia rauasulatuskohti on käsitlenud Vagn Fabritius Buchwald oma 2008 aasta monograafias (Buchwald 2008). Uurimise all olid nii 12. sajandi algusest pärit otsetaandamisahjud ja nende toodang, kuid ka osmundid, uusaegsed rauasulatuskohad- ning meetodid (nt Buchwald 2008, 40–72, 228). Osmund on Rootsist pärit kõrgahjus toodetud raud, mis oli laialt levinud kaubaks 13. kuni 16. sajanditel (Buchwald 2008, 251–252). Norra lõunaosa on intensiivselt uuritud Bernt Rundbergeti poolt, kes koostas põhjaliku töö Gråfjell-i piirkonna rauasulatusesest (Rundberget 2017).

Lätis on rauasulatuskohtade uuringutega tegelenud enne 21. sajandit Aleksis Anteins (Anteins 1976). Oluline osa on hiljem olnud varemmainitud Bernt Rundbergetil, kes oli üks osalistest TechTrans projektis, mille üks uurimisaladest oli otsetaandamise teel

toodetud rauatootmine ja selle areng (Rundberget et al. 2020, 96–97). Suurem osa informatsioonist on tulnud 1950.–1960. aastatel rajatud hüdroelektrijaama ehitustööde ajal teostatud proovikaevamistelt (Rundberget et al. 2020, 96). Rauasulatus on nii rauaajal, kui 13.–16. sajandil, leidnud aset vahetult ava- või kindlustatud asulate juures (Rundberget et al. 2020, 101). Kokku on jälgi leitud 18 muistiselt. Tuumikuks on olnud Daugava jõeäär, kus asuvad mitmed pika kasutusajaga rauasulatuskohad nagu Spietiņi, Koknese ja Asote (Rundberget et al. 2020, 99–100). Märke rauasulatusest on leitud ka 13. sajandi vallutuseelsetest aolinnadest. Nimelt üks paremini säilinud silindrilise šahti ja šlaki väljalaskesüvendiga ahjudest on leitud Dinaburga asulakohast (Rundberget et al. 2020, 99). Keskaegsetes linnustes domineerivad valdavalt ääsid ja sepistusšlakk, mis osutab vaid sepatööga tegelemisele. Vaid Lokstene linnusest on leitud ahi, mis võiks viidata sealsele rauasulatussele (Rundberget et al. 2020, 100).

Leedus rauasulatuskohtade uuringuid on teostatud minimaalselt. Alles 2003. aastal ilmus Jonas Navasaitise poolt suurem teos rauasulatusest, mis hõlmas kogu Leedut (Žalnierius et al. 2007, 377). Eelrooma-rauaajast kuni 10. sajandini dateeritud rauasulatusahje on avastatud 50, mis pärinevad kokku 19 muistiselt (Žalnierius et al. 2007, 377). Hästi säilinud rauasulatusahje on leitud Kereliai linnamäel ja Paplienija asulakohas (Žalnierius et al. 2007, 377). Üheks paremini uuritud rauasulatuskohaks on Virbaliūnai, millest valmis 2007. aastal kaks artiklit (Žalnierius et al. 2007 ja Navasaitis, Selskienė 2007). Tegemist on esimese rauasulatuskohaga Kesk-Leedus (Žalnierius et al. 2007, 378), kust avastati kolm ahjude gruppi ja kaks miiliauku (Žalnierius et al. 2007, 379).

### 1.1.2 Metallograafilised uuringud

20. sajandil toimus suurem huvi kasv arheometallurgia vastu, millega hakati kaasama uuringutesse materjaliteadusi (Saage 2020, 12). Kuna tüpoloogiate koostamisega saab raudesemete kohta vaid piiratud teadmisi, siis mikrostruktuuri- ja keemilised analüüsid annavad olulist lisainformatsiooni näiteks valmistusviisi kohta. Esimesed metallograafilised analüüsid šlakist teostati Eestis 1901 professor Gustav Tammanni poolt, kes käsitles haudadest pärit šlakki. Keemiliste analüüsidega alustati hiljem samal aastal, mille eestvedajaks oli Georg Landesen (Peets 2003, 18). Oluline panus

on antud 1962. aasta teoses Aleksis Anteinsi poolt, kes teostas Eesti damaskitud odaotstest metallograafilisi analüüse (Anteins 1962). 1975. aastal võttis teema suuremal määral üle Jüri Selirand, kes jätkas samuti damaskitud odaotstega (Selirand 1975). Ka Jüri Peets on viinud läbi mitmeid metallograafilisi analüüse erinevatest kontekstist tööriistade peal, millel ta määras erinevaid parameetreid nagu esemete süsinikusisaldust jpm (Peets 2003, 223–263). Viimasel ajal on Eestis metallograafiliste uuringutega kõige rohkem tegelenud Ragnar Saage, kelle sulest valmis 2020. aastal doktoritöö (Saage 2020). Sama autori poolt on ilmunud mitmed artiklid Käku sepikojast leitud esemete metallograafilistest analüüsides (Saage et al. 2015, 2018b). Peale selle on käsitletud Eestist leitud rauast putkkirveste valmistamistehnoloogiat ja analüüsitud neid metallograafiliselt (Saage et al. 2018a).

Rootsis on üheks eestvedajaks olnud Eva Hjärthner-Holdar, kes oma 1993. aasta teoses viis läbimuuhulgas põhjalikke šlaki mikrostruktuuri ja keemilise koostise uuringuid (Hjärthner-Holdar 1993, 38–120). Oluline osa terves Skandinaavias kuulub kindlasti Vagn Fabricius Buchwaldile, kes teostas metallograafilisi analüüse mitmete raudesemete peal (nt Buchwald 2008, 58–63). Taanis mängis olulist rolli Arne Jouttijärvi, kes on peale päritoluanalüüsides ka metallograafiat teinud (nt Daly et al. 2021). Kindlasti tuleb mainida ka Thomas Birchi uuringuid Illerupi leiukohast avastatud ratsanikuodadest, kus ta analüüsis odade sepistamisvõtteid ja milliseid protsesse nende peal läbi on viidud (Birch 2018, 249–267).

Lätis on teostatud suurem uuring 2020. aastal Bernt Rundbergeti ja tema meeskonna poolt. Kasutades XRD ja XRF meetodeid, analüüsiti šlakke erinevatest kontekstidest (Rundberget et al. 2020).

Venemaal on peamiseks arheometallograafiliste analüüsides eestvedajaks olnud Boris Kolchin, kes juba 1953 avaldas teose, mis seadis aluse sealsete uuringute jaoks (Kolchin 1953). Kolchin analüüsis erinevate esemetetüüpide mikrostruktuuri ja nende keemilist koostist (nt Kolchin 1953, 173–177). 1990ndateni ilmusid teosed mitmete Kolchini õpilaste poolt (G.A.Voznesenskaya, N.V.Ryndina jt.), kes arendasid meetodeid ja praktikaid edasi (Zavyalov 2011 ja seal esinevad viited).

### 1.1.3 Eksperimentaalarheoloogia

Rauasulatuse uuringute juures on olnud olulisel kohal eksperimentaalarheoloogilised katsed, kus viiakse läbi oletatavate eelajalooliste meetoditega läbi rauasulatuseksperimente. See hõlmab enamasti kõiki kaasnevaid protsesse nagu söe miilamine, maagi röstimine, ahju ehitamine ja lõpuks, rauasulatus.

Eestis on esimesena üritanud kohalikust soomaagist eksperimendina rauda sulatada Arvi Lauringson, kes teostas oma katsed 1978. aastal. Paraku, kuna võrdlusmaterjal ja teadmised olid puudulikud, siis valmistatud ahi jäi oma omadustelt ebasobilikuks, et seal piisavat õhuvoolu tekiks. Seetõttu ei saavutatud ka sulamistemperatuuri, mis viis katse läbikukkumiseni (Peets 2003, 132). Kõige suuremat mõju on Eestis arvatavasti avaldanud Jüri Peets, kes on viinud läbi mitmeid rauasulatuseksperimente – 1988. aastal teostas ta näiteks söe miilamise katse 2x2 m ja 0,7–0,8 sügavuses augus (Peets 2003, 40). Samal aastal toimus ka esimene rauasulatus, mille käigus sai Peets 7 kg röstitud maagist 680 g rauda, mis muutus aga liiga kõrge temperatuuri tõttu malmiks. Hilisemad eksperimendid polnud samuti kuigi edukad, suutes toota kõigest üle 200 g rauda (Peets 2003, 133). Viljakamad olid aga 1990. aastal läbi viidud katsed, millest ühe vältel suudeti 22 kg maagist toota 2 kg rauda (Peets 2003, 133). Metoodiliselt paremad katsed on viinud läbi Ragnar Saage, kes mangaanirikka maagi kasutamisega on saanud häid tulemusi (Saage 2020, 49).

Väljaspool Eestit on raua eksperimentaalarheoloogiat teostatud ka Skandinaavias. Taanis viis 1973. aastal läbi sealseid esimesed rauasulatuskatsed Olfert Voss, kes võttis aluseks Jüütimaa ahjud (Stenvik 2003, 127). Rootsis on peamiseks eestvedajaks olnud Lars Erik Englund, kes on Tranemos proovinud saavutada identseid tulemusi nii raua, kui šlakiga, nagu esineb Rootsi arheoloogilises materjalis (Stenvik 2003, 128). Norras viidi läbi mitmed eksperimendid Ole Evenstadi 18. sajandist pärit raamatu järgi, kus osalesid tuntud arheoloogid, nagu Ivar Berre, Lars F. Stenvik ja Arne Espelund (Stenvik 2003, 128).

### 1.1.4 Päritoluanalüüsid

Arheoloogiliste metallide päritolu uurimine keemilise koostise järgi ulatub tagasi 19. saj keskpaika, mil loodeti lokaliseerida maagi leiukohti (Schwab et al. 2006, 433). Arheometallurg Jerzy Piaskowski on 1976. aastal kirjutatud artiklis pakkunud välja, et eri kohtadest pärit rauda on võimalik eristada nendes sisalduvate šlakipesade järgi (Schwab et al. 2006, 434). Suured läbimurded selle koha pealt on toimunud 20. sajandi lõpus, 21. sajandi alguses, proovides leida makroelementide vahelisi seoseid (Devos et al. 2000; Blakelock et al. 2009; Charlton et al. 2012; Jouttijärvi 2013) ja hiljem kõrvutades makroelemente jälgelementidega (Schwab et al. 2006; Desaulty et al. 2009; Dillmann et al. 2017; L’Heritier et al. 2020). Meetodina on kasutatud ainult skanneeriva elektronmikroskoobi (edaspidi SEM-EDS-i, vt. ptk 3.3) tulemusi, rakendades lineaardiskriminantanalüüsi ja hierarhilist klasternalüüsi (Charlton 2015, 214) ning kombinatsiooni laserablatsiooniga (edaspidi LA-ICP-MS, vt. ptk 3.4) ja SEM-EDS-i tulemustest (Devos et al. 2000), rakendades andmete visualiseerimisel põhikomponendianalüüsi (edaspidi PCA) (Birch 2013; Dillmann et al. 2017; L’Heritier et al. 2020; Żabiński et al. 2020).

Suurim osa uuringutest on viidud läbi Kesk-Euroopas, piirdudes peamiselt Saksa- ja Prantsusmaaga (nt. Desaulty et al. 2009; Dillmann et al. 2017; L’Heritier et al. 2020). Prantsusmaal on olnud uuringu all keskaegsed katedraalid nagu nt Bourges (Desaulty 2009; L’Heritier et al. 2020) ja Saksamaal keskenduti Põhja-Alpide raudesemete ringlusele (Dillmann et al. 2017). Uuringuid on läbi viidud ka Taanis, kus oli analüüsitavaks materjaliks mitmed raudesemed, šlakid ja ka eraldi uurimusena Havori ratsanikuoda päritolu (Jouttijärvi 2013; Birch 2018).

Baltikumis on raua päritoluanalüüsi teostatud vähesel määral. Leedus tegeles sellega Jonas Navasaitis koos oma meeskonnaga (Navasaitis et al. 2010). Samal aastal tehti ka analüüs, suures osas samade autorite poolt, Leedu putkkirvestest (Bertašius et al. 2010).

## **1.2 Ajalooline taust**

Rauasulatus sai alguse umbes 17. saj eKr tänapäeva Lähis-Idas, arvatavalt Ida-Anatoolia aladel (Pleiner 2000, 14; Rundberget 2017, 44). Lõuna-Euroopa aladele

levis see umbes aastal 1000 eKr ja järgmise 500 aasta jooksul üle terve Euroopa (Rundberget 2017, 44). Arvatavasti arenes see välja vasesulatusest, kuna mõlemad jagavad sarnaseid tunnuseid töötlemisel (Pleiner 2000, 11). Norras on mitmest varasest rauasulatuskohast leitud ka pronksivalu jääke, mis kinnitab nende omavahelist seost (Rundberget 2017, 44). Uued meetodid ja ideed levisid läbi Anatoolia ja Kreeka Kesk-Euroopasse, kust oli vaba tee Skandinaaviasse. Üks rauasulatuse leviku suundi oli läbi Kesk-Venemaa ja sealt omakorda edasi (Pleiner 2000, 23).

Mis aga võis olla põhjus, mis andis aluse rauatehnoloogia ülevõtmiseks nii mitmetes kogukondades, jättes varasema pronksitöötuse oma endise võimsuse varju? Tehnoloogia ülevõtmist mõjutavad mitmed tegurid, mis annavad tõuke, et asendada varasemalt laialt kasutatud esemete valmistusviise. Peamiseks faktoriks on arvatavasti rauamaagi laialdane levik. Kui muid metalle, nagu tina ja vask, leidub vähestes piirkondades, siis rauamaagi territoriaalne katvus on palju suurem. Olulist rolli uue tehnoloogia liikumapanekuks mängis kindlasti 1200. aasta paiku eKr toimunud pronksiaja tsivilisatsiooni kollaps (Fischer, Bürge 2017, 18), millega kaasnes hiljem ka Kesk- ja Põhja Euroopa varasemate pronksi kaubanduskeskuste ja võrgustike lagunemine (Kriiska et al. 2020, 158). Lisaks võis olla oluliseks raua eelis materjalina ja ühilduvus varasemate teadmiste ning traditsioonidega (Hjärthner-Holdar, Risberg 2009, 982). On ka võimalus, et lääne hemisfääris võis olla vana poliitiline süsteem pikaajalisem, mis oli vastumeelne tehnoloogilistele uuendustele (Hjärthner-Holdar, Risberg 2009, 983). See võis takistada raua ülevõtmist mingil määral, kuid siiski erinevate tegurite tõttu löid tehnoloogilised innovatsioonid siiski läbi. Tulenevalt sellest, on mitmed autorid pidanud rauda üheks peamiseks ajendiks sotsiaalse hierarhia edasiarengus, kuid ka maastiku struktureerimises ja geostrateegilistes muutustes (Dillmann et al. 2017, 108).

Eestis hakkas praeguste andmete järgi rauatootmine pihta eelrooma rauaaja lõpul või rooma rauaaja alguses (Peets 2012, 34). Peale mõningate šlakileidude Asva kindlustatud asulast ja Iru linnamäelt, siis Eestis puuduvad tõendid rauasulatuse kohta eelrooma rauaajast (Peets 2012, 34). Sama on ka Lätiga, kus rauast esemed on kasutusele võetud enne rauasulatust (Rundberget et al. 2020, 96). Rauasulatuse levik

toimus Eesti territooriumile arvatavasti lõuna poolt. Võimalustena kerkivad esile Kesk-Euroopa, Poola, Lõuna-Skandinaavia või Lõuna-Venemaa (Peets 2003, 47–48).

Esimesed jäljed rauasulatusest Ida-Soomes pärinevad sarnaselt Eestile samuti eelrooma rauaaja lõpust/rooma rauaaja algusest (1–400 pKr) (Lavento 1999, 75). Rootsi on aga erand, kus on märgid rauasulatusest juba pronksiaja keskpaigast. Peale pronksivalu on järelikult paralleelselt tegeletud ka marginaalselt rauasulatusega (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 5). Hilisest pronksiajast on rauasulatuskohti leitud juba vähemalt 40, mis esinevad asulakohtadest ja kalmetest eemal (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 5). Võib oletada, et tegemist oli perioodiga, kus otsiti peamiselt paremaid maagikohti, mis tulenes järsult suurenevast rauavajadusest (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 5). Kõige intensiivsemalt sulatati rauda Smålandis, eriti lõunapoolsetel aladel, kust on avastatud suurtes kogustes ahje (Buchwald 2008, 61). Taanis domineerib rooma rauaajal Lääne-Jüütimaa, kust on avastatud tuhandete ahjudega rauasulatuskomplekse (Jouttijärvi 2013, 407). Alates 8. sajandi algusest pKr massiline rauatootmine katkeb ja jätkub suuremal määral alles 11. sajandist pKr (Jouttijärvi 2013, 407–408). Norrasse jõudis otsetaandamise meetodil rauasulatus viimastel sajanditel eKr (Rundberget 2017, 45). Glomma jõe äärest leitud šlakk on dateeritud 400 eKr, kuid nii varajane ajastus on kaheldav (Rundberget 2017, 44). Usaldusväärsemad dateeringud jäävad hoopis vahemikku 300–200 eKr (Rundberget 2017, 45). Otsetaandamise meetodi kasutus intensiivistus eriti Trøndelagis ja Norra kaguosas (Rundberget 2017, 3), mis võib viitada oluliste maagimaardlate esinemistele selles piirkonnas.

Balti hõimud Leedu alal hakkasid raudesemeid kasutama eelrooma rauaajal 4.–1. sajandil eKr (Stankus 1996, 57) nagu ka Eestis. Sellest ajast on leitud mõningaid tööriistu, mis arvatavasti pole aga tehtud kohalikust soomaagist, vaid on imporditud varasemalt rauasulatustehnoloogiat ja sepakunsti tundvatelt aladelt (Stankus 1996, 57). Velykuskie ja Nevierske linnamägedelt on leitud šlakki, kuid ahjujäänused puuduvad, mistõttu pole võimalik rauasulatust eelrooma rauaajast tõestada (Stankus 1996, 57). Baltide rauatootmine arenes hoogsalt 1.–5. sajandil pKr, mis ilmneb tehnoloogias – süsinikusisaldust osati ajada kuni 0,8 % peale (Navasaitis, Selskienė 2007, 391).

Rauasulatuskohtade asupaikade valik pidi tulenema mingitest teguritest, mis muudaks seal raua tootmise võimalikuks. Seetõttu tekkisid need paikadesse, kus toormaterjal oli hõlpsasti kättesaadav (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 13). Eestis on reeglina rauasulatuskohad paiknenud asulakohtadest eemal, soode ääres kõrgematel pinnavormidel, kust on võimalik kõiki rauasulatusel kasutatavaid loodusvarasid hankida nagu soomaak, savi ja puit. Norras näiteks kehtib sarnane muster nagu Eestis, kus rauasulatuskohad asetsevad enamasti asulakohtadest kõrgemal (Espelund 2011, 88). Rootsis, Öggestorp-i rauasulatuskoha näitel, Vätterni järve lõunaosas, on asustus hääbunud peale rauasulatuskoha tekkimist (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 22). Seetõttu on alust arvata, et ka Rootsis paiknesid asulad mingist hetkest rauasulatuskohtadest kaugemal. Samas Taanis Skovmark-tüüpi ahjude leiukohad on kõik tihedalt seotud asulakohtadega (Jouttijärvi, Voss 2011, 55).

### 1.3 Rauamaak

Eesti territooriumil leidub küll kristalses aluskorras rauda, kuid esiajaloolisel ajal pole seda oma raske kättesaadavuse tõttu kasutatud. Samas esineb märkimisväärt kogustes limooniti ehk soo- või järvemaaki. See koosneb peamiselt hüdrogötiidist ( $3\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), kuid lisanditena leidub hüdrohematiiti ( $\text{Fe}_{2-x}(\text{OH})_x\text{O}_{3-x}$ ) ja hüdrolepidokrokiiti ( $\gamma\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ ), mis on limoniidi tekke aluseks (Peets 2003, 31). Üheks koostisaineks võib olla ka ooker ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (Peets 2003, 31), mida on Eestis juba mesoliitikumi lõpust saadik kasutatud näiteks narva keraamika perioodil savinõude pealispinna värvimiseks (Kriiska et al. 2017, 61) ja neoliitikumis haudadesse panekuks (Tõrv 2016, 284). See näitab, et ookrit osati juba enne rauasulatusel levikut leida ja tarvitada.

Soomaagi leiukohad on Eesti territooriumil koondunud märgaladele, peamiselt soodesse ja rabadesse. Teke on seotud nii anorgaaniliste, kui bioorgaaniliste oksüdatsiooniprotsessidega. Peamiseks ajendiks on pinnavee voolamine märgaladele, kus erinevad rauabakterid hakkavad osalema maagi moodustusprotsessis (Peets 2003, 31). Maagi teket mõjutavad omakorda vee happelisus (pH tase 6.2) (Peets 2003, 31), temperatuur ja vees lahustunud hapniku ning vee redokspotentsiaal (Lauringson 1995, 52). Soomaagi rauakoostis võib olla kohati üsna suur, kuni 38.5% ja seda saab veelgi

tõsta röstimisprotsessiga (Peets 2003, 33). Röstimise käigus asetatakse maak kas maapealsele või natukene süvendatud põhjaga puuriidale (Moilanen 2015, 36). Kõrgete temperatuuride käes põledes kaotab maak suure osa oma ebapuhtustest nagu orgaanika (Peets 2003, 33). Peale selle toimuvad muutused maagi keemilises koostises ja see magnetiseerub (Pleiner 2000, 108).

Kvaliteetse raua valmistamiseks ei sobinud iga maak. Peamiseks mõjutajaks võis olla fosforisisaldus, mis muudab raua tugevamaks ja korrosioonikindlamaks, kuid samas rabadaks (Peets 2003, 35; Moilanen 2015, 33). Rabedus mõjutab esemete valmistusprotsessi, kuna neid pole võimalik se pistada nii edukalt (Thiele, Hošek 2015, 114). See võib olla põhjendus argumendile, et raudesemeid on sisse imporditud aladele, kus olid ainult fosforirikkad maagid. Kuigi fosfor lisab mehaaniliselt ebasobivaid omadusi rauale, on relvade damaskimisel seda keerukate mustrite esiletoomiseks siiski kasutatud (Thiele, Hošek 2015, 115). Vähesel määral võivad suurendada fosfori koostist muud tegurid, nagu rauasulatusprotsessi käigus tekkinud tuhk (Navasaitis et al. 2010, 113). Maagi kvaliteeti tõstab veel mangaanisisaldus, mis võimaldab süsinikul legerida paremini rauaga. See annab paremad võimalused terase valmistamiseks otsetaandamisega ahjus (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 34). Mangaanirikas maak on olnud laialdaselt kasutusel nii Skandinaavias, kui ka näiteks Noricumi Rooma provintsis (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 36).

Eestis järvemaaki praeguste teadmiste kohaselt kasutatud pole. Seda on leitud vaid Vagula, Peipsi, Viker ja Ruhijärvest (Lauringson 1995, 52–53). Samas Soomes on järvemaagi kasutamine kestnud kuni lausa 19. sajandini, kus on see olulist osa mänginud tollasest rauatööstusest (Peets 2003, 32).

Päritoluuuringud rauamaagi peal on olnud üks teemadest, mida on nii eelmise, kui praeguse sajandi jooksul mitmeti üritatud teostada. Tulemused pole olnud aga eriti viljakandvad. Peamiseks probleemiks on rauasulatus käigus läbi viidud protsessid, mis mõjutavad suurel määral maagi keemilist koostist (Schwab et al. 2006, 442). Seetõttu on käesolevas töös võetud analüüsimiseks šlakk ja šlakipesad, mille keemiline koostis jääb rauasulatus käigus sarnaseks nagu ta algselt oli. Üheks peamiseks mõjutajaks on maagi röstimine, mille tõttu kaotab see S ja CO<sub>2</sub> väärtusi raudsulfidide ja karbonaatide oksüdatsiooni käigus (Milot et al. 2016, 15). Sellest

hoolimata on Itaalia uurimisrühm, eesotsas Marco Benvenutiga, saanud Elba saare rauamaagi uuringutega tulemusi, kus kasutati meetodina ICP-MS-i ja SEM-EDS-i. Nimelt suutsid nad tuvastada uurimispiirkonna rauamaagis laialdaselt esinenud elemendid, milleks olid volfram ja tina (Benvenuti et al. 2013, 496).

#### **1.4 Rauasulatusprotsess**

Rauasulatusprotsess on mitmeetapiline ettevõtmine, mis hõlmab mitmeid oskusi, mida meistrid pidid valdama. Selle hulka kuulusid ettevalmistustööd, millest esimeseks oli toormaterjali hankimine. Kõigepealt oli vajalik koguda rauda sisaldavat materjali – nagu varasemalt mainitud, sobis selleks Eesti territooriumil looduslikult leiduv ja hõlpsasti kättesaadav soomaak. Maak oli vaja puhastada orgaanikast ja muudest ebapuhtustest, mis selle sees leidsid. Selleks röstiti maaki tuleriidal. Puidu kogumisele järgnes söe miilamine, mis hõlmas hapnikuvaeses keskkonnas põletamist. Lõpptulemuseks oli puusüsi, mis oli sobilik ahjus kasutamiseks ja vajaliku temperatuuri saavutamiseks. Puusüsi tagas suurema energia väljundi, kui puit, mistõttu on see efektiivsem (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 7). Miilamisest Eestis mingeid konkreetseid struktuure või ehitisi pole, küll on mõningaid süvendeid tõlgendatud kui miiliaukudena (Peets 2003, 38–39). Rootsist on miilamiseks kasutatud konstruktsioone leitud, millest enamik kuuluvad hilisrauaaega. Osad süvendeid on arvatud kuulumaks isegi pronksi- ja varasesse rauaaega (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 7).

Järgmiseks oli vajalik saavutada redutseeriv keskkond. Selleks kasutati juba savinõude valmistamisel tuntud savi, et vormida sobiv ahi, kuhu asetada maak ja süsi. Peamine viis rauasulatuses enne kõrgahjude tekkimist oli otsetaandamise meetod. Tegemist on meetodiga, kus temperatuur ei ületa 1250–1300°C (Rundberget 2017, 3). Etappide poolest võib ahjus toimuvad protsessid jagada kolmeks – söe põlemine ja redutseeruva süsinikdioksiidi moodustamine, röstitud maagist raua redutseerumine CO abil ja šlaki formeerumine jääkivist ning raudoksiidist (Peets 2003, 44).

Šlaki formatsioon on keskne protsess, kuna see neelab hapnikku ja piirab süsiniku pääsemist rauda (Rundberget 2017, 3). Oluline oli pidevalt sulatuse käigus moodustunud šlakki välja lasta (Rundberget 2017, 3), et seda ei hanguks liigeses

koguses toorraua külge. Šlaki väljalaskmiseks kaevati ahju ehitamisega süvendid või jäeti väike avaus ahju seina (Moilanen 2015, 36). Eestist tõendid esemete kohta, millega šlakki välja lasti, puuduvad. Lõuna-Norrast, Gråfjell-i alalt on leitud rauast konksukujuline teravik, mis oli arvatavasti mitmeotstarbeline – nimelt võidi seda kasutada ahju seinte ja õhutusdüüside puhastamiseks ning ka šlaki väljalaskmiseks (Rundberget 2017, 116).

Otsetaandamise teel läbi viidud rauasulatuse käigus ei saavuta raud sulamistemperatuuri, mistõttu rauaoksiidide redutseerumise käigus muutub lõpp-produkt nn käsnaudaks (Blakelock et al. 2009, 1745; Saage 2020, 17). Käsnaud on ahju põhja kogunenud tahkel kujul praktiliselt süsinikuvaba-, kuid kõikuva süsinikusisaldusega raud, mis tekib vaid otsetaandamisel toodetud raua teel (Saage 2020, 17). Otsetaandamise meetod ei kadunud peale 14. sajandit kuhugi, isegi, et laialdaselt hakkas levima kõrgahjude toodang. Vähesel määral kasutati otsetaandamist 15.–17. sajanditel Skandinaavias ja Soomes edasi (Saage 2020, 50). Kõrgahjude, sealhulgas osmundi tulek ei välistanud järelkult rauasulatust otsetaandamise teel ja säilis veel pikalt peale uute tehnoloogiate kasutuselevõttu (Buchwald 2008, 61, 67).

Šlakk võib sõltuvalt maagist käituda väga erinevalt. Näiteks Rootsis leiduvad maagid võivad olla väga viskoossed, mistõttu šlakil on väga raske välja voolata. Selle tõttu pidi protsessi läbiviija šlaki ahjust teistmoodi välja saama (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 7). Saadud käsnauda hakatakse ahjust võttes uuesti töötlemata, mis hõlmab pidevat vasardamist ja taaskuumutamist. Selle käigus suudetakse eemaldada suurem osa raua sisse jäänud šlakist, kuid väike osa säilib isegi terve sepistamisprotsessi vältel väikeste pesadena eseme sisemuses (Charlton et al. 2012, 2281).

Selle kohta, et kas rauasulatus oli individuaalne või kogukondlik protsess, mingeid konkreetseid näitajaid pole. Norra materjalist on järeldatud, et vähemalt nelja ahjuga rauasulatusest võis osa võtta umbes 10 inimest (Espelund 2011, 88). See teeks umbes 2–3 inimest ahju kohta, mis võib olla realistlik, kuna minimaalselt pidi üks lõõtsadega toimetama, teine šlakki välja laskma ja pärast ka toorrauda sepistama. Küsimus tekib ka selle kohta, et kas sepp võttis protsessist ise osa või eksisteerisid spetsialiseerunud rauasulatajad. Kohtla peitleiust avastatud 3.–5. sajandi kirve metallograafiline analüüs näitas suurt šlakisisaldust, mis võiks osutada sellele, et kirve valmistanud sepp on ka

ise rauasulatusprotsessist osa võtnud (Saage 2020, 27). See võis viidata enda tarbeks toodetud rauale.

Hiljem, 11. või 12. sajandil on toimunud spetsialiseerumine, mille käigus kogused ning vajadus suurenesid (Saage 2020, 27). Trøndelagi rauasulatuskoha näitel võimalik, et juba vahemikus 300 eKr–600. aastal pKr oli tegemist spetsialiseeritud töölistega, kes tootsid pea industriaalsetes mahtudes. On alust arvata, et sellise tootmise taga oli tugev logistiline põhi, mille hulka kuulus nii toiduga varustamine, kui ka vahetustega töö (Espelund 2011, 89). Arvatavasti oli igapäevaselt suurem rõhk põllumajandusel, kuid suvekuudel kasutati oskuslikke töölisi rauasulatuses ja kevad ning sügis jäid maagi kogumiseks (Espelund 2011, 89). Talv oli arvatavasti sobilik puude veoks, mille käigus transporditi seda rauasulatuskohtadesse (Espelund 2011, 89).

#### 1.4.1 Rauasulatusahjudest

##### 1.4.1.1 Varased ahjud

Eesti esimesed rauasulatusahjud kuuluvad rooma rauaaega ja olid puitraketisega (Metsküla ja Tindimurru) või savist seintega, ümara põhiplaaniga ning tihtipeale ka graniidist põhjaga. Puitrakistega ahjud oli küljepikkusega 1,5–2,5 m ja 30–40 cm läbimõõduga ahjušahtiga (Lang 2007, 159). Mäetaguse Metsküla I ahju näitel moodustasid tuletukid nelinurkse kuju, mis kinnitab rõhtpalkehitist. Ahju keskel paiknes šahtiosa, mille läbimõõt oli 30–40 cm (Peets 2012, 35). Varaseid ahjusid on Eestis kaevanud peamiselt 1990ndatel Jüri Peets, mis ta avastas Metskülast, Tindimurru, Puiatolt, Raelt, Jürilt, Olustverest, Siksalist ja Kalatsovast (Peets 2003, 51–68).

Soomes teostati esimesed varase rauaaaja rauasulatusahju kaevamised 1980ndatel Äkälänniemi lähedal paiknevas Kajaani asulas (Lavento 1999, 75). Sealsed varased rauasulatusahjud on omased idas levinud tüüpidele. Peamisteks on Äkälänniemi kaevatud kividest laotud kandilised põhiplaaniga- ja kuplikujulised ahjud (Lavento 1999, 76). Varased Skandinaavia ahjud erinevad hoopis täiesti idapoolsetest. Peamiseks erinevuseks on savi kasutus seinte vormimisel, püstine struktuur ja ahju pealt lahti jätmise, et soodustada tuuletõmmet ning kuumust (Lavento 1999, 76).

Rootsis on näiteks kõikide ahjude põhiliseks tunnuseks šaht ja selle all asetsev šlaki äravoolusüvend (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 6). Ahju sisemise osa läbimõõt oli 0,3 m ja šahtide kõrgus jäi arvatavasti 0,6–2 m vahele (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 7). Peamiselt olid ahjud mõeldud mitmekordseks kasutamiseks, kuid hilisel eelrooma rauaajal ja rooma rauaajal, hakkasid Lääne-Rootsis levima ka ühekordsed ahjud (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 6). Ühekordsete ahjude juured on peamiselt Jüütimaal, Taanis, kuid neid leidub ka mujal Põhja-Euroopas (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 7). Taanis on varaseimad šlakiauguga ahjud kasutusel alates 140 pKr, mis on nimetatud Skovmark-tüüpi ahjuks (Jouttijärvi, Voss 2011, 55). Nime on need saanud Skovmarki leiukoha järgi, kus toimusid 1966. aastal esimesed kaevamised, mille käigus dateeriti ahi 90–110 pKr (Jouttijärvi, Voss 2011, 55). Peamiselt on säilinud vaid ahjude põhjaosa 10–15 cm võrra, mis sisaldab väheses koguses šlakki (Jouttijärvi, Voss 2011, 55). Skovmark-tüüpi ahjudel oli šahti läbimõõduks 30–35 cm (Jouttijärvi, Voss 2011, 57).

Norras on varaselt olnud kasutusel nn Heglesvollen-tüüpi ahjud, mis on dateeritud 300 eKr–600 pKr (Espelund 2011, 88). Samu ahje on leitud ka Rootsist, Jämtland-ist, kus suur osa neist on rannikusidused (Espelund 2011, 90). Peamisteks tunnusteks on šaht ja kividega ümbritsetud šlakiauk (Espelund 2011, 88). Šlakiaukude läbimõõt ja sügavus olid umbes 80 cm ja seal paiknes ka 40 cm laiune vertikaalne pilu, kust oli võimalik šlakki eemaldada ja ka hiljem toorraud välja võtta (Espelund 2011, 88). Rauasulatus toimus kahel erineval temperatuuritasemel, kus redutseerumisprotsess leidis aset madalal temperatuuril, kuid kõrgel temperatuuril lasti välja šlakki. Temperatuuri tõstmiseks kasutati lõhestatud mändi, kus tõrva põlemine käivitas nn korstnaefekti (Espelund 2011, 88). Sellise meetodi puhul polnud lõõtsa osalus rauasulatusprotsessi käigus vajalik (Espelund 2011, 88).

Leedu rauasulatusahjudest saab eristada 3 tüüpi, mida kasutatakse valdavalt eelrooma rauaajast kuni 10. sajandini pKr – šlakiauguga, avatud koldega ja šlaki väljalaskesüvendiga (Žalnierius et al. 2007, 377; Navasaitis, Selskienė 2007, 387). Virbaliūnai ahjud annavad hea ülevaate milliseid meetodeid kasutati šlaki väljalaskesüvenditega ahjude valmistamisel. Ahju seinad vormiti liivaga segatud savist, mis soodustab struktuuri tugevust. Õhutusdüüsid sel ajal veel puudusid, aga on leitud õhutusavasid, mida kasutati samal otstarbel (Navasaitis, Selskienė 2007, 389).

Sellistes ahjudes oli võimalik sulatada u. 18–20 kg soomaaki, millest võis saada 1,5–2 kg toorrauda (Navasaitis, Selskienė 2007, 390). Läti ja Leedu näitavad oma rauasulatusahjude poolest üsna sarnast pilti. Tegemist on sarnase šlaki väljalaskmismeetodiga, mida nimetatakse šlakiauguga ahjuks. Sellist tüüpi Eestis kasutatud ei ole, mistõttu on Lõuna-Baltikumi tehnoloogilised impulsid on tulnud arvatavasti mujalt (Rundberget et al. 2020, 106).

#### 1.4.1.2 Hilised ahjud

Hilised ahjud olid Eestis Tuui-Pelisoo ala näitel eristatud kahe tüübina: Maapealsed ja maasse süvendatud. Maapealsete seinapaksus on olnud 20–25 cm ja terve ahju läbimõõt on jäänud 90–100 cm vahele. Maasse süvendatud ahjud on olnud toestatud kuni 40 cm pinnase- ja graniidist laotud kiviringi poolt. Seinapaksus oli 25–27 cm ja konstruktsioon toestatud liiva ja saviga. Välimine läbimõõt on olnud sama, mis maapealsetel ahjudel (Peets 2003, 127).

Norras on hilistest ahjudest eristatav 3 tüüpi – Trøndelag-, Østland- ja Eg-tüüpi. Tegemist oli nn Norras eristatud I faasi ahjudega, mille peamiseks tunnuseks oli šlaki äravooluks kaevatud auk šahti alla (Rundberget 2017, 45). Trøndelag-tüüpi ahje on nimetatud oma leiukoha, Trøndelagi maakonna järgi, kus paiknes ka turustuskeskus (Rundberget 2017, 45). Varasemalt on neid nimetatud ka Østland-tüüpi ahjudeks, mis avastati Dokkfløy rauasulatuskohast ja mida hiljem on leitud peamiselt Lõuna- ja Ida-Norrast kuni lääneosani (Rundberget 2017, 45–46). Eg-tüüpi ahjud on sarnased Jüütimaalt ja Poola aladelt leitud Świątokrzyskie ahjudega, mis olid ühekordselt kasutatavad (Rundberget 2017, 46). 500–700 pKr Eg-tüüp hakkas kaduma, peale mida algas 800–1400 eKr II faas, kus domineerisid šlaki väljalaskeahjud (Rundberget 2017, 46). 11. sajandi alguses kestsid Hedmarki rauasulatustraditsiooni näol šahtidega šlaki väljalaskeahjud, mille välisosa isolatsioon moodustati liivast, kiviplaatidest ja harvemini puitrakestistest (Rundberget 2017, 321).

Lätis üheks rauasulatusahju musternäidiseks on Asote linnamäelt leitud 10. sajandisse pKr dateeritud näidis, millest on säilinud šahtiosa ja põhi, milleks oli suur graniidist plaat (Rundberget et al. 2020, 99). Valdav osa ahjudest oli aga 0,6–1 m välimise ja

0,2–0,3 meetrise sisemise šahti diameetriga ja šlaki väljalaskesüvendiga, mis paiknes ahju põhja lähedal (Rundberget et al. 2020, 99).

## 2. Materjal

### 2.1 Šlakk

Rauasulatuse peamine kõrvalprodukt on šlakk, mis tekib raudoksiidi ja ränidioksiidi reageerimisel (Blakelock et al. 2009, 1745). Laiemalt on šlakk igasugusest põletamisest tekkinud klaasistunud materjal, mille tekkimiseks on vaja kuumust, mis jääb vähemalt 1200°C juurde (Haustein et al. 2003, 519). Keemiliselt on tegemist sulanud ränidioksiidi või selle seguga, mis võib vähesel määral sisaldada teisi oksiide, fosfaate, boraate, sulfiite, karbiide, puhtaid metalle ja muid keemilisi ühendeid (Bachmann 1982, 1). See on arvatavasti seotud sellega, et rauasulatuse käigus võtab šlakk enda sisse ebapuhtusi, millele lisandub materjali sulanud ahjuvoodrist, tuhast ja õhutusdüüsidest (Blakelock et al. 2009, 1745). Sellest hoolimata on šlakk suhteliselt homogeenne, kuid seda suurendavad veel ühtlased rauasulatustingimused ja kasutatud maak (Blakelock et al. 2009, 1748). Räbu mikrostruktuurile on omased gaasiaugud, mis erinevad suuruse ja kuju poolest ning muudavad materjali poorseks (Bachmann 1982, 4).

Kogu rauaga töötlemise protsessi käigus on šlakiga kokkupuude paratamatu. Nii rauasulatuse kui ka sepistamise käigus eraldub šlakki, millest tuleneb kaksikjaotus – rauasulatusšlakk ja sepistusšlakk (Peets 2003, 45). Rauasulatusšlakil on 2 hõlpsasti äratuntavat vormi – šlakikoogid ja väljalaskešlakk, millest esimene võtab enamasti ahju põhja kuju ning teine tahkunud kujul voolavaid vorme (Pleiner 2000, 262–263). Sepistusšlakk erineb rauasulatusšlakist kuju poolest – nimelt, sepistusšlakk on kujult poolsfääriline (Bachmann 1982, 5). Sepistamise käigus eemalduvad raua sepistamisel oksiididena tagilibled, mis esinevad arheoloogilises materjalis õhukeste rauasisaldusega laastudena, (Pleiner 2006, 110).

Rauasulatuse käigus tekkinud šlakk võib moodustuda mitmetel viisidel (Blakelock et al. 2009, 1745). Kuna kõik šlaki tüübid moodustuvad erinevate protsesside käigus, siis pole nad sarnased morfoloogiliselt ega ega keemiliselt. Näiteks savirikas šlakk on keemilise koostise poolest üsna heterogeenne, aga väljalaskešlakk on pigem homogeenne (Blakelock et al. 2009, 1752). Tüüpiline väljalaskešlaki mikrostruktuur

sisaldab peamiselt fajalliidi kristalle ning wüstiiti (Bachmann 1982, 3; Erb-Satullo, Walton 2017, 12).

Šlaki keemilise koostise kujunemine hõlmab mitmeid paralleelselt käivaid toiminguid. Pelgalt kuumutusprotsess ei suuda lahti saada maagis esinevatest ebapuhtustest. Nimelt, üks peamisi mitteredutseerivaid ühendeid on SiO<sub>2</sub>, mille sulamiseks on vaja 1723°C temperatuuri ja mida saab eemaldada vaid räubustiga (Charlton et al. 2012, 2282). Veel üheks keemilise koostise mõjutatajaks on kuumutusprotsessi käigus šlakki imuvad elemendid, nagu savi sees leiduvad ühendid. Haruldased muldmetallid peaksid jääma puutumata (Coustures et al. 2003, 610), millest võib järeldada, et jälgelemendid säilitavad oma algse koostise. Charlton et al. (2012, 2282) on oma töös toonud šlaki lõpliku keemilise kompositsiooni kujunemise valemi:

$$C_{slag} = (O - R) + F + L + A - V$$

C ehk šlaki keemiline koostis on võrdne maagi kõigi elementidega pluss jälgelemendid, millest tuleb lahutada sellest R ehk kõik redutseerunud metallid. Sellele tuleb juurde liita F ehk räubusti, L ehk ahjuvooderdus, A ehk tuhk ja lahutada V ehk lenduvad ühendid (Charlton et al. 2012, 2282).

Üheks peamiseks analüüsitavaks lisandiks raudesemete sees on šlakipesad, mis tekivad redutseerimata ühenditest, mis jäävad rauasulatuse käigus toorraua või eseme sisse lõksu (Birch 2013, 116; L'Heritier et al. 2020, 2). Tegemist on mikrotasandil paljastuvate nähtustega, mis ka peale sepistamist püsivad esemetes ja säilitavad oma keemilise koostise, nagu see oli rauasulatuse ajal (Jouttijärvi 2013, 402). Šlakipesade makro- ja mikroelementide mõõtmisega ja erinevate statistiliste analüüsi meetodite rakendamisega, on võimalik viia kokku raudese tema tootmiskohaga (Buchwald, Wivel 1998, 73; Coustures et al. 2003, 600; Birch, Martinon-Torres 2015, 70; Birch 2018, 267; L'Heritier et al. 2020, 8). Päritolu on võimalik määrata vaid sel juhul, kui on olemas kvalitatiivsed või kvantitatiivsed vahed looduslike maakide mineraalses koostises (Charlton 2015, 212). Šlakipesad pole oma keemilise koostise poolest enamasti ühtlased, vaid eristuvad teatud omaduste poolest. Tegemist on eri faasidega, milles on võimalik tuvastada vähemalt viite erinevust: (Blakelock et al. 2009, 1749).

1. Mitmefaasiline, kõrge fajalliidisaldusega klaasimaatriksis
2. Ühefaasiline, ainult klaasja struktuuriga
3. Mitmefaasiline, klaasimaatriksis leidub fajalliiti ja wüstiiti
4. Mitmefaasiline, magneesiumirikaid oliviine sisaldav
5. Mitmefaasiline leeliselisi klaase sisaldav

Šlakipesade arv ja kuju on väheselt mõjutatud toorrauast kangiks tegemisel, mis osutab sepistamise käigus pesade kadumisele ja tekkimisele (Blakelock et al. 2009, 1751). Sekundaartötluse käigus on ka võimalik luua teisejärgulisi šlakipesasid, mis võivad moodustuda protsessidega nagu näiteks sepakeevitus (Blakelock et al. 2009, 1746).

Šlakki on esitatud kui peamist võimalikku ühendust maagiga, kuna maagi jälgelemendid sõltuvad geoloogilisest formatsioonist ja keskkonnast (Schwab et al. 2006, 442). Samas šlaki formatsiooni mõjutavad ka tuhk, liiv ja ahju seinad, mistõttu keemiline koostis pole ainult peegeldus maagist (Blakelock et al. 2009, 1746; Charlton et al. 2012, 2282). Ahju seinte panus keemilise koostise muutumisel võib olla üsna suur, nimelt makroelementidest on mõjutatud Na, Mg, Al ja Si kuni 50% ning mikroelementidest V, Ni, Nb, Hf ja Ta kuni 45% (Birch 2013, 136). Tuhk muudab šlaki  $K_2O$ ,  $MgO$  ja  $CaO$  väärtusi, kuid ahju seinte jaoks kasutatud savi rikastab  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  ja  $SiO_2$  koostist (Birch 2018, 268–269). Seetõttu on šlaki abil võimalik jälgida vaid nn „rauasulatussüsteeme,“ mitte jõuda tagasi maagini (Blakelock et al. 2009, 1746).

Üheks šlaki probleemiks on konkreetse konteksti puudumine, kuna neid avastatakse tihtipeale juhuleidudena asulakohtadest, mille tõttu on ajaline määrang raskendatud. Seepärast on dateerimiseks proovitud erinevaid meetodeid, mis võiks selle osas aidata – nimelt šlakis peamiselt esinevat mineraali, fajalliiti, on proovitud dateerida termoluminesentsiga (Bachmann 1982, 3; Haustein et al. 2003, 520). See nõuaks šlaki ja šlakipesade mikrostruktuuris fajalliidirikkaid kohti, mida alati ei esine. Üheks peamiseks mõjutajaks on arvatavasti suur kogus siirdemetallide ioone, mis võib meetodi kasutamist pärssida (Bachmann 1982, 3). Teise dateerimisvõimalusena on pakutud ka OSL-i (optiliselt stimuleeritud luminesents), mida saab võtta šlakis peituvatest kvartsiteradest (Gautiger 2001, 973). Seetõttu luminesentsmeetodid on võimalused šlaki dateerimiseks olemas, kuid Eestis neid rakendatud pole.

## 2.2 Kaubatoorikud

Raud oli muinas-, kuid ka keskajal üks olulisemaid tooteid, mille vedamine pidi toimuma sihtotstarbeliselt ja kasumlikult. Tihtipeale liikus raud juba valmis sepistatud esemetena, mis Eestis on eelrooma rauaajal nähtav erinevate imporditud tööriistade või ehete näol (Kriiska et al. 2020, 186). Raudesemeid, peamiselt relvi, on kasutatud ka jumalustele pühendatud panustena, esindamaks sõjaõnne (Birch 2018, 247), mis ilmneb ka Eestis mitmetelt märgaladelt leitud peitleidude näol – nt Kohtla (Oras, Kriiska 2014).

Raua transportimiseks on antud sekundaartöötuse käigus sellele tihtipeale eseme vorm. Näiteks Volga-Oka jõgikonnas on Djakovo kultuuri muististe hulgas levinud rauast käevõrud (Peets 2012, 34). Enne kangide laiemat kasutuselevõttu keskajal, on eksisteerinud raua vorm, mis on arvatavasti olnud kasutatud kaubanduseks (Loftsgarden 2019, 76, 78). Selleks on kaubatoorikud, mida on leitud Eestis enamasti asulakohtadest eemal asuvatel piirialadel (Saage et al. 2022, 69). Tegemist on nn pooltoodanguga, mis on omanud määratud väärtust (Loftsgarden 2019, 78). Kuigi neid võib olla leitud ka ühekaupa, siis tihti esinevad kaubatoorikud kogumitena. Mõndadeks näideteks on Maalasti (Saage et al. 2022, 69) ja Varja küla kaubatoorikud, millest esimene leiti 3-se ja teine 9-se kogumina (Saage 2020, 28; Kiudsoo 2018, 4). Kujult on nad Eestis enamasti ristkülikukujulised (Jn. 1), kuid harva esineb ka poolsfäärilisi, nagu Praaga kaubatoorikud (Saage, Tvauri 2019, 18, Jn. 26), millesuguseid on leitud näiteks Venemaalt (Kolchin 1953, 43, Jn. 13). Ristkülikukujulised on Varjast leitud kaubatoorikute järgi dateeritavad 11. sajandi lõppu, 13. sajandi algusesse, mistõttu võivad teised laadsed vormid kuuluda samasse perioodi.



Joonis 1. Erinevat tüüpi Eestist leitud kaubatoorikud. 1. Poolsfääriline Praaga kaubatoorik. 2. Kirvega raiutud Sürgavere kaubatoorik 3. Nelinurkne Varja kaubatoorik 4. Alulinna ümmargune kaubatoorik. Foto ja töötlus: Sander Jegorov.

Norras oli levinud 2 raua vormi, mida oma olemuselt võiks kaubatoorikuks liigitada. Esimeseks olid kirvesarnased kangid, millel oli üks ots sepistatud lapikuks (nagu kirve tera) ja teise otsa tehtud auk või konks (Loftsgarden 2019, 78). Teiseks on kas 18 või 5–12 kilosed šlakivabad, madala fosfori- ja väävlisisaldusega toorikud, mis on keskelt raiutud kirvega pooleks (Espelund 2011, 90, 92). Keskaegse Islandi kirjalikes allikates on omakorda eristatud kahte tüüpi kirvega pooleks raiutud kaubatoorikut – *blásturjárn* ja *fellujárn*, millest viimane olevat rohkem töödeldud (Loftsgarden 2019, 78). Mõlemile on vasteid ka mujalt maadest – kirvesarnastel kangidel on analoogiaid peale Lõuna-Norra endise Määrimaa ja Lõuna-Poola territooriumitelt ja kirvega raiutud toorikutel Aasias, Venemaal ja Kesk-Euroopas (Loftsgarden 2019, 78). Rootsis on olnud tüüpilised labidakujulised kaubatoorikud (Buchwald 2008, 28) ja pikaks sepistatud raudkangi laadne- ning vikatikujuline vorm (Buchwald 2008, 32).

Lätist on leitud toorrauda 11 asulakohast. Neist aga vaid 1 on võimalik kaubatoorik – leitud Mežotne linnamäelt, kaalub 0,8 kg ja on sepistatud ümaraks. Sellele on vasteid Eestist Alulinna tooriku näol ja Venemaalt 11.–13. sajandist (Rundberget et al. 2020, 99). Leedust on kindlaid kaubatoorikuid leitud 1, Petراسiunaist, mis on asulakoha järgi dateeritud 2.–3. sajandisse pKr ja mille kaaluks oli 1,2 kg (Stankus 1996, 57).

Üks peamisi probleeme kaubatoorikutega on nende esinemine juhuleidudena (Kiudsoo, Tamla 2016, 78; Saage et al. 2022, 66), mille tõttu on dateerimine raskendatud. Kuna osades šlakkides ja arvatavasti ka kaubatoorikutes võib olla söe jäänuseid (Peets 2003, 46), siis esineb võimalus nende dateerimiseks <sup>14</sup>C meetodiga. Kuna raud sisaldab ka ise süsinikku, peamiselt tsementiidi kujul, siis on võimalik kasutada ka seda (Cresswell 1992, 898). Eestis on viimast rakendatud Varja kaubatooriku peal ja saadud usutavaid tulemusi, määratledes selle 11. sajandi lõpust, 13. sajandi alguseni pKr<sup>1</sup>. Dateerimise küsimust saab lahendada ka kaubatoorikutes leiduvate šlakipesade abil. See näeks ette luminesentsmeetodi rakendamist šlaki peal, kuid selle kasutamine võib olla raskendatud. Kuna šlakimaatriksist on keeruline puhast klaasi eemaldada, siis ilmneb see peamise probleemina (Gautiger 2001, 973).

Ka kaubaraud on üks materjalidest, mille peal on võimalik teha pärioluuuringuid. Mikrostruktuuris on tihtipeale näha rohkelt kas šlakki või šlakipesi, mis on säilinud peale algset sepistamist. Analüüsid kaubarauast võimaldavad luua mitmeid kaubanduse mudeleid, mis põhinevad arheoloogilistel- ja päritolu-uuringutel (Charlton et al. 2012, 2280).

---

<sup>1</sup>Ua-77127 – 95% AD 1052 - AD 1078 (6.5%) AD 1156 - AD 1230 (85.5%), AD 1243 - AD 1258 (3.1%)

### 3. Teooria ja meetod

Töö keskseks ideeks on raudesemete päritolu määramine. Miks aga sellisele küsimusele vastata ja mida annab juurde selle uurimine? Peamine eesmärk on saada teadmisi selle kohta, mida muude meetoditega pole võimalik tuvastada. Näiteks Prantsuse katedraalide ehitamisel on kasutatud rauast toestusi, mille valmistamiskohti pole võimalik kirjalike allikatega määrata (Desaulty et al. 2009, 2445). Keemiliste analüüside teostamine rauast toestuste peal võimaldab suures plaanis luua tarneahelat, mille najalt omakorda saab taastada kaubandusvõrgustikku, mis toimis katedraali ehitajate ja toestuste tootjate vahel. Sama stsenaariumi on võimalik rakendada teises kontekstis muude esemete peal – näiteks kaubandussuhted kaubatoorikute valmistajate ja nende tarbijate vahel.

Raua päritolu-uuringuid on ajaloo vältel väga mitmeti teostatud – nimelt on proovitud erinevate meetoditega saada ühetaolist tulemust, milleks on ühiste joonte leidmine keemilistes komponentides. Mõningateks näideteks on siderofiilsed jälgelemendid metallis ja Pb- ja Sr ning ka Fe isotoobid. Viimasel ajal on edu saanud osmiumi isotoobid maagis ja šlakis (L’Heritier et al. 2020, 2). Isotoopidega jätkates, päritolu määramisel on kasutatud ka raua isotoope, mis andsid paljulubavaid tulemusi, suutes eristada raudkangide valmistamiskohta (Milot et al. 2016, 17–18).

Rauas säilivad šlakipesad on muutunud peamiseks nähtuseks, mille peal on pidevalt edasi arendatud analüütilisi ja statistilisi meetodeid (Coustures et al. 2003; Schwab et al. 2006; Desaulty et al. 2009; Charlton et al. 2012; Jouttijärvi 2013, Birch, Martinon-Torres 2015; Birch 2018; L’Heritier et al. 2020). Neist mitmetes on kasutatud vaid makroelemente (nt Coustures et al. 2003; Charlton et al. 2012 jt), mida aga peetakse kohalikul tasemel ebatäpseks (Lauridsen et al. 2023, 191). Populaarsust on kogunud makroelementide ja jälgelementide kõrvutamise, kuna jälgelementide keemiline kompositsioon ei tohiks olla mõjutatud rauasulatuse protsessist (Dillmann et al. 2017, 109). Meetod on teostatav vaid otsetaandamisel toodetud raua peal ja väidetavalt ei toimi kõrgahjude toodangu peal (Lauridsen et al. 2023, 191). Meetodini, mis teeks andmed sobivaks, milline on parim andmestiku töötlusviis jne, pole kokkuleppele jõutud (Charlton et al. 2012, 2280). Säilib aga tuumikpõhimõte, kus üritatakse

keemilises koostises esinevaid sarnasusi üksteisega ühildada ja selle käigus mustreid leida (Charlton et al. 2012, 2281). Tulemuste interpreteerimisel on võimalus esemete keemilist koostist üksteisega võrrelda, millega näha, kas need on samas rauasulatusüsteemis valmistatud (Birch 2018, 267). Peamine probleem tuleb esemete päritolu määramisel sisse võrdlusmaterjali puhul, kuna toormaterjal on tihti sisse toodud raudkangide või toorikute näol (Birch 2018, 267–268).

Euroopa põhjaosas on erinevate šlakide keemilist koostist võimalik eristada kohalike geoloogiliste erinevuste alusel. Selle järgi on võimalik tuvastada raua või šlaki päritolu (Jouttijärvi 2013, 405). Mõlema puhul esineb aga probleem – šlakk samast rauasulatuskohast ja šlakipesad ühest raudesemest võivad olla väga erinevad. See võib suures osas tuleneda raudoksiidi protsendi tõusmisest rauasulatus käigus toimuvate protsesside käigus (Jouttijärvi 2013, 405). Põhja-Euroopa tasandik on moreeni ja paekivirohke, mis lisab maaki suurel määral Ca, Mg, ja P väärtusi (Jouttijärvi 2013, 406). Suhteliselt sama pilt peaks kehtima ka Kesk-Eestis ja Põhja-Eestis, kus pealiskord sisaldab samuti paekivi ja moreeni. Näiteks Rootsis, Jämtlandis, on šlakile omaseks Ca väärtuste suur osakaal, mis on arvatavasti seotud siluri aluspõhjaga (Buchwald 2008, 50). Lõuna-Norras ja Lõuna-Rootsis on suurem Al ning K osakaal võrreldes Põhja-Jüütimaaga (Jouttijärvi 2013, 407). Ka Eestis peaksid olema erinevused keemilises koostises, kui muutused kompositsioonis on tingitud geoloogilise aluspõhja erinevustest. Lõuna-Eestis mängivad rolli Devoni-, Kesk-Eestis, Saaremaal- ja Hiiumaa lõunaosas Siluri-, Põhja-, Loode- ja Kirde-Eestis ordoviitsiumi- ning põhjarannikul Kambriumi- ja Ediacara sette kivimid. Seetõttu peaks sama geoloogilise aluspõhja alal tegutsenud rauasulatuskohad näitama sarnaseid keemilisi signatuure ja vastupidi.

Jälgelemendid on ülejäänud keemilisest koostisest paremad muutujad, kuna nad on makroelementidega võrreldes vähem reostusest mõjutatud (L'Heritier et al. 2020, 2). Ühed olulisemad elemendid, mis säilivad otsetaandamise teel toodetud rauas, on Ni, Cu, As ja Co (Navasaitis et al. 2010, 113). Mitmed elemendid nagu As, Sb, Ni ja Co rikastuvad toorrauas, kuid ammenduvad šlakis (Desaulty et al. 2009, 2451). Zn on erand, kuna see ammendub nii toorrauas, kui ka šlakis (Desaulty et al. 2009, 2451). Rauasulatus ajal šlakki üle kanduvad elemendid rauasulatus ajal pole mõjutatud

ahjuseintest ega tuhast ja säilitavad šlakis ning hiljem šlakipesadena rauas sama keemilise koostise (Desaulty et al. 2009, 2451).

Teatud jälgelemendid võivad isegi väikestes kogustes mõjutada metalli mikrostruktuuri ja mehaanilisi omadusi. Nimelt näiteks arseen kutsub esile ferriidi kujunemisprotsessi (Navasaitis et al. 2010, 113). Koobalt on oluline, kuna see tõstab kulumiskindlust ja nikkel terase tugevust, aga mitte kõvadust (Moilanen 2015, 34). Makroelementidega šlaki keemilise koostise kõrvutamise annab vaid üksikutele juhtudel tulemusi, mistõttu on oluline neid täiendada jälgelementidega (Desaulty et al. 2009, 2446).

Jälgelementide uuringutel kasutatakse peamiselt mitme muutujaga statistilisi analüüse, millest peamisteks on HAC (hierarhiline aglomeratiivne rühmitus), PCA (põhikomponendianalüüs) ja LDA (lineaarne diskriminantanalüüs) (L'Heritier et al. 2020, 2). Neist mitmeid on teostatud erinevates artiklites, kus jälgelemente mõõdeti LA-ICP-MS-iga (Dillmann et al. 2017, 111 ja seal esinevad viited). PCA eelis seisneb selle loomuses – tegemist on kolmedimensionaalse eukleidilise ruumiga, mis annab andmestikus rohkem võimalusi variatsioonide tekkimises. Jälgelemendid, mida selle meetodiga rakendatakse, on Y, La, Ce, Pr, Nd, Gd, Sm, Eu, Tb, Yb, Th, U, Mg, Al, Si, K, Ca ja Mn (Dillmann et al. 2017, 112).

### **3.1 Proovide kontekst**

Kõigepeal tuli läbida kriitiline materjali valik, mis hõlmas erinevaid jälgitavaid kategooriaid. Eesmärgiks oli katta suurem osa Eestist (Tabel 1), et saada võimalikult laia ulatusega tulemusi. Oluline oli ka tähelepanu pöörata muististe kontekstile – sobilikud olid vaid rauasulatuskohad, kuna vastasel juhul võis šlakk olla sepistamise käigus tekkinud, mille tõttu meetodit ei saaks rakendada. Järgneb materjali kontekstide kirjeldus, kus tuuakse kõik leiukohad välja ja avatakse nende arheoloogilist tausta.

Tabel 1. Proovid ja nende kohta käiv informatsioon.

Nr	Asukoht	Ese	Proovi nr andmetes	Kirjeldus	Dateering
1	Tuiu	Toorraud	1		11.–14. saj
2	Tõrise	Rauasulatusšlakk	3		13.–14. saj
3	Saunakünka	Toorraud ja šlakk	4		7.–9. saj
4	Saunakünka	Toorraud ja šlakk	5		
5	Saunakünka	Toorraud ja šlakk	6		
6	Metsamägara	Kaubatoorik	7		
7	Tarumaa	Rauasulatusšlakk	13	Šlakikoogi pealt, lohu servalt	12.–14. saj
8	Tarumaa	Rauasulatusšlakk	14	Šlakikoogi alt	
9	Alulinna	Kaubatoorik	15		
10	Punikvere	Rauasulatusšlakk	17		12.–14. saj
11	Praaga I	Kaubatoorik	18		
12	Praaga II	Kaubatoorik	19		
13	Olustvere	Toorraud	21		1.–5. saj
14	Olustvere	Toorraud	22		1.–5. saj
15	Maalasti II	Kaubatoorik	23		
16	Maalasti I	Kaubatoorik	24		
17	Ollepa	Kaubatoorik	25		
18	Kuremaa	Rauakang	29		12.–... saj
19	Tartu/Lossi	Rauasulatusšlakk	30		
20	Sürgavere	Kaubatoorik	31		
21	Uugla	Rauasulatusšlakk	32		
22	Aa	Kaubatoorik	33		
23	Varja	Kaubatoorik	34		11.–13. saj
24	Tuiu (uus)	Rauasulatusšlakk	36	Ahju põhjast	11.–14. saj
25	Rihula	Rauasulatusšlakk	37		
26	Tarvastu	Osmund	38		14. saj

Tuiu rauasaatmemäed on Eestis kõige paremini ja mahukamalt läbi uuritud rauasulatuskoht, mis paikneb Põhja-Saaremaal, Antsülüsjärve ja Litoriinamere düünidel (Peets 2003, 99). Peets jagas rauasulatuskoha mitmeks kaevatud alaks, kust paljudelt avastati üks või mitu rauasulatusahju ja mitmeid miiliauke (Peets 2003, 104–123). Leidude hulgas oli suurtes kogustes šlakki, toorrauda ja tihtipeale ka röstitud

maaki (Peets 2003, 105). Peets peab Tuiut šlaki koguste järgi Eesti kõige suuremaks rauasulatuskohaks (Peets 2003, 135). Rauasulatus algas vähesemal määral arvatavasti 8.–11. sajandist, kuid muutus eriti intensiivseks 12.–14. sajanditel (Peets 2003, 102).

Tõrise rauasulatuskoht asub Tuiu läheduses, jäädes Järise järvest kagusse. Ka Tõrise, nagu Tuiugi, paikneb düünil, kus suur osa pinnasest on kaetud šlakikuhjadega (Peets 2003, 123). Võrreldes Tuiuga, pole Tõrise leiumaterjal nii rikkalik – näiteks keraamika täiesti puudus (Peets 2003, 125). Territooriumilt rauasulatusahje ei avastatud, kuid osasid söeseid alasid tõlgendati miiliaukudena (Peets 2003, 125–126). Rauasulatuskoht dateeriti šlakikuhja alt leitud söega 13.–14. sajandisse (Peets 2003, 126).

Saunakükat on maininud 1887. aastal juba Constantin Grewingk, kus ta oletas, et tegemist võiks olla rauasulatuskohaga (Peets 2003, 71). Tegemist oli madalal liivasel mõhnal paikneva muistisega, kus kultuurkiht küündis 30–40 sentimeetrini. Kaevamiste käigus leiti mitmeid toorraua, ahju ja ääsi tükke (Peets 2003, 71–72). Rauasulatuskoht dateeriti 7.–9. sajandisse (Peets 2003, 72).

Metsamägara küla aladel muistiseid leitud pole, kuid juhuleiuna avastati sealt nelinurkne nn raudkang (Saage 2022, 4). Tegu on arvatavasti tuvastamata asulakoha perifeeriast leitud kaubatoorikuga. Territooriumilt avastati ka šlakki, mis ei pruugi olla tekkinud rauasulatusel (Saage 2022, 4).

Palasi rauasulatuskoht paikneb Lääne-Virumaal Sirtsu- ja Punasoo vahel. Tegemist on 12. ja 13. sajandil ühe suurima rauasulatuskohaga Virumaal (Peets 2003, 87). Muistiselt leiti mitmeid õhutusdüüside katkeid ja räbu, mille suurem kontsentratsioon oli madala liivase kõrgendiku kõrgemas osas (Peets 2003, 88). Kuigi suurem osa varasematest šlakikuhjadest oli arvatavasti tasaseks küntud, siis üks oli terviklikult säilinud (Peets 2003, 88). Ahje kaevamiste käigus ei leitud, kuid oletatavasti oli nende läbimõõt 30–40 cm (Peets 2003, 90).

Tarumaa rauasulatuskohta on esmamainitud juba 1886. aastal. Muistis paikneb endisel soosaarel, kus kaevati Peetsi poolt läbi 120 m<sup>2</sup> (Peets 2003, 93). Kultuurkiht oli umbes 50 cm paksune, mis sisaldas nii keskaegset sepikoja aset, kui varasemat

rauasulatuskohta (Peets 2003, 94–95). Varasemast kihistusest leiti nii ääs, kui ka rauasulatusahju põhi (Peets 2003, 96). Ääsi juurest leitud söe järgi dateeriti rauasulatuskoht 13.–14. sajandisse (Peets 2003, 96).

Alulinna kaubatoorikud leiti Aa küla vahetust lähedusest juhuleidudena. Tegemist oli 2 ümmarguse kaubatoorikuga, millest üks oli teisest umbes poole väiksem. Toorikud asusid 30–40 cm sügavusel turbases pinnases looduslike setete peal.

1984. aastal toimusid välitööd Punikvere rauasulatuskohas, mille käigus leiti suurtes kogustes šlakki, õhutusdüüside katkeid ja põlenud savi (Peets 2003, 98). Õhutusdüüside katkeid saadi kokku 1002, mille järgi sai teha üldistusi kasutatud lõõtsade tila suurusest (Peets 2003, 98).

Praaga on Emajõe suudmes paiknenud asulakoht, mis on tänaseks vee all. Asulakoht on läbi otsitud detektoristide poolt, kes peale mitmete hästi säilinud raudesemete leidsid sealt ka muuhulgas poolsfäärilised toorrauakamakad, mille puhul on tegemist kaubatoorikutega (Saage, Tvauri 2019, 3).

Olustvere asulakohta Põhja-Sakalas seostatakse peamiselt hõbemüntide aardeleidudega, mis leiti päästekaevamiste käigus 1978. aastal, kuid samalt alalt on avastatud ka kaks rauasulatusahju põhja (Peets 2003, 63). Ahjude põhjast leiti riibitud keraamikat, mille järgi dateeriti mõlemad I aastatuhande I poolde. Varast dateeringut kinnitas ka õhutusdüüside puudumine (Peets 2003, 63).

Maalasti asulakoht paikneb Navesti jõe põhjakaldal. Asulakoha perifeeriast avastati kolme kaubatoorikuga (Saage et al. 2022, 69). Peitleidu saab tõlgendada kahte moodi – kas need olid sinna peidetud selleks, et hiljem ümber sepiatada või on tegemist ohverdusega, mis sobitub nende leidumisega märgalade serval (Saage et al. 2022, 73–74).

Ollepast (varasemalt Võhma) leiti juhuleiuna šlakikook, mille südamik osutus olema terasest (Saage 2020, 27). Tõenäoliselt on tegemist kaubatoorikuga, milles on säilinud suures koguses šlakki. See võib osutada sellele, et šlaki eemaldamine täies mahus

polnud vajalik ja keskenduti suuremate ja kompaktsemate toorrauakamakatele töötlustele (Saage 2020, 27).

Kuremaalt leitud rauakangi leidmise kohta informatsioon puudub. Territooriumil paikneb mõisa kaitsetsoon, mis arvatavasti hõlmab kas muinas- või keskaegset asulakohta.

Tartus toimunud Lossi tänava kaevamiste käigus avastati Vilma Trummali, Ain Mäesalu ja Romeo Metsalliku juhitud kaevamiste käigus metalliahjude põhjad (Blehner 2022, 3). Prooviks valiti šlakk ahjust nr 20, mis leidude põhjal dateeriti muinasaega, kuigi tõendid muinasaegsest rauasulatustest, peale paari eseme, puuduvad (Blehner 2022, 7).

Viljandimaal paiknevast Sürgaverest leiti Madisepäeva lahingupaiga otsingutel 2021. aastal kaubatoorik, mis oma vormilt näib nagu kolmandik suuremast rauapätsist. Sellele lähim analoog leiti 2022. aastal Viljandi ordulinnuselt koos suure hulga osmunditega.

Uugla on ainuke Läänemaal paiknev rauasulatuskoht, mida Mati Mandel on tõlgendanud kui 11.-14. sajandil tegutsenud sepatöö keskust, kust ta avastas suurtes kogustes väidetavate lohkääside põhju (Mandel 2022, 195).

Ida-Virumaal paiknevast Aa külast on leitud viis ristkülikukujulist kaubatoorikut (Kiudsoo 2017, 2), mis on valdavalt läbivad kasutatud vormide hulgas. Kaal varieerus 1,3–2 kg vahel ja mõõdud olid keskmiselt 10 x 10 x 5 cm (Kiudsoo 2017, 2).

Varja küla jääb samuti Ida-Virumaale, kust leitud raua puhul oli tegu ristkülikukujulise kaubatooriku vormiga (Saage 2020, 28). Kokku leiti 9 kaubatoorikut, millest võib järeldada, et tegemist on varasemalt tervikliku laiiali kantud peitleiuga (Kiudsoo 2018, 4). Toorikud paiknesid künnikihis 3–15 cm sügavusel (Kiudsoo 2018, 3).

Rihula rauasulatuskompleks avastati Lääne-Virumaalt 2016. aastal Kaarel Siku poolt läbi viidud välitööde käigus LIFEME projekti raames (Sikk 2017). 2022 teostati

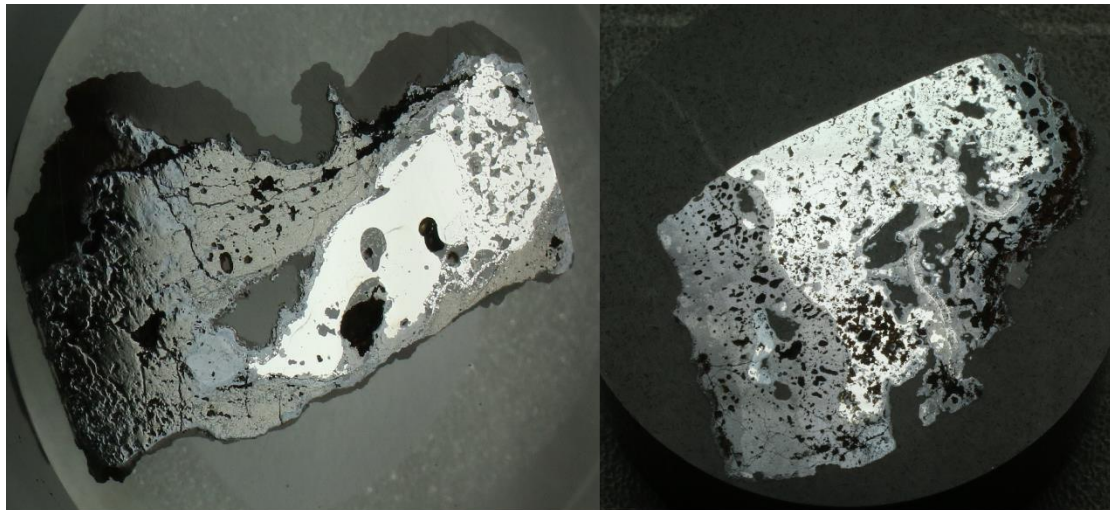
arheoloogilised väljakaevamised Rihula II rauasulatuskohas, kust avastati mitmed šlakikuhjatised (Jegorov et al. in press). Õhutusdüüsi katke leidmine ja keraamika dateerisid muistise 11.–14. sajandisse (Jegorov et al. in press).

Tarvastu linnusel ja eeslinnusel toimusid kaevamised 2021 suvel, juhatatud Heiki Valgu ja Ragnar Saage poolt vastavalt (Valk et al. 2022). Eeslinnusel paiknevast sepikojast ja linnuse vallikraavist leiti Rootsisis toodetud osmundeid (Valk et al. 2022, 121, fig. 13), mis viitavad raua sissetoomisele linnuse territooriumile arvatavasti ümbersepistamiseks.

### **3.2 Proovide ettevalmistus**

Materjali hulgas oli mitmeid esemetüüpe – toorraud (Tuiu/Saunakünka), šlakitükid (Punikvere), rauakang (Kuremaa) ja kaubatoorikud (Ollepa, Sürgavere, Maalasti). Peets oli oma monograafias küll mitmeid proovidest ka uurinud keemiliselt, kuid makroelementide tasemel proovid läbimurdvaid tulemusi ei andnud (Peets 2003, 45). Toorrauda käsitleti analüüsides rauasulatusšlakina, kuna nende keemiline koostis peaks identne olema. Kõik proovideks valitud esemed olid seotud otsetaandamise teel raua tootmisega, väljaarvatud üks – võrdluseks võeti Tarvastu linnusest leitud osmund, kuna tegemist on Rootsisis kõrgahjus toodetud rauaga, mis peaks erinema oma koostiselt Eesti materjalist.

Enne keemiliste analüüsides läbiviimist oli vajalik proovid ette valmistada. Selleks tehti šlakidest, kaubatoorikutest ja toorraudast mikrolihvid (Jn. 2), mille lõikamiseks kasutati IsoMet 4000 täppissaagi. Hapramad materjalid, peamiselt šlakk, murti tangidega pooleks ja lihviti ühele küljele sile tasapind, mis vähendas protsessi ajaliskulu. Kõik ristlõiked asetati termopressi Buehler PhenoCure-ga termoplastikusse. Sellele järgnes lihvimine, mille käigus kasutati Buehler AutoMet 250 lihvpinki. Lihvimisel kasutati 74 µm suuruse teraga teemantketast ja 45, 9, 3, 1 µm teemantsuspensioone. Proove ei söövitatud ühegi kemikaaliga, et vältida võimalikku saastuvust. Samas on viidud läbi analüüse, kus proove söövitati ja nende puhul näis, et see tulemusi ei mõjutanud (L'Heritier et al. 2020, 8).



Joonis 2. Vasakul mikrolihv Olustvere toorrauast ja paremal Ollepa kaubatoorikust. Foto ja töötlus: Sander Jegorov.

Ristlõigete metallograafilisel analüüsil kasutati vaatluseks Tartu Ülikooli arheoloogia labori optilist mikroskoopi ja mikrokõvadusmõõtjat Wilson Tukon 1102 Vickeri skaalal. Sellega tehti märgistused šlakipesade juurde, et hiljemate meetoditega oleks neid võimalik uuesti üles leida. Varasemalt sellist uudset meetodikat kasutatud ei ole. Märgistamisel oli mikrokõvadusmõõtjaga kasutatud raskus 1 kg või 0,5 kg ja vajutusaeg 15 sekundit. Kokku märgistati ühele proovile 10 šlakirikast kohta, kuna see annab piisava ülevaate iga proovi kohta (Schwab et al. 2006, 436). Selleks, et šlaki ja šlakipesade mikrostruktuuris korrektseid struktuure leida, kõrvutati varasemalt tehtud töödes kasutatud fotosid samadest materjalidest erinevate faaside tuvastamiseks (nt Hjärthner-Holdar 1993; Buchwald 2008). Kui proov sisaldas rauda, siis selle seest otsiti šlakipesi, millel on väiksem võimalus olla kontaminatsiooniga kokku puutunud.

Kõik proovid kaeti enne keemilisi analüüse süsinikuga. Selleks kasutati Tartu Ülikooli Geoloogiainstituudi Agar Auto Carbon Coater süsinikkatjat. Katmisperioodiks valiti 10 või 20 sekundit. Vajadusel korrati protsessi, et proovil oleks nähtav süsinikkiht peal. Katmisel kasutati süsinikpulkasid, mis temperatuuri kriitilise piirini tõstmisel ja üksteisega hõõrdumisel, purunesid, kattes pinna õhukese kihiga. Süsinikuga katmine oli vajalik, kuna see võimaldab SEM-EDS-is saada paremat BSE (Backscatter electron) pilti.

### **3.3 SEM-EDS**

SEM-EDS (skanneeriv elektronmikroskoop energiadispersiivse spektromeetriga) on mikroskoop, millega on võimalik teostada skanneerivat vaatlust kambris asetatud objektile. Peale selle on võimalik määrata kindla ala keemilist koostist EDS-iga. SEM-EDS-i kohta on mitmeid artikleid kirjutatud (Girão et al. 2017; Mohammed, Abdullah 2019 jne), mis laskuvad masina tööprotsessi detailidesse, mistõttu siin seda lähemalt ei käsitleta.

#### **3.3.1 SEM-EDS sätted**

Töös kasutati SEM-EDS-i makroelementide mõõtmiseks, et saada nn alusjoont järgnevateks analüüsideks. Peamine eesmärk oli rüni koostise määramine, et seda pärast kasutada LA-ICP-MS-i analüüsides sisestandardina (Desaulty et al. 2009, 2448; Birch 2013, 92). Selleks kasuti Tartu Ülikooli Geoloogiainstituudi ZEISS EVO 15MA mikroskoopi INCA Energy 350 detektoriga. Proove uuriti kõrgvaakumis. Mõõtmisteks kasutati tagasihajunud elektronide (Backscattered Electron – BSE) režiimi ja keemiline koostis määrati energiadispersiivse (EDS) detektorsüsteemiga Oxford X-Max. Keemiliste elementide tuvastamisel kasutati AZtec tarkvara. Pildid SEM kambris tehti 500x suurendusega, vajadusel ka lähemalt. EDS-iga mõõdetav ala oli samuti 500x suurendusega, samuti vajadusel ka lähemalt, kui kõrval esines rauda, roostet või muid mineraale.

### **3.4 LA-ICP-MS**

LA-ICP-MS on induktiiv-sidestatud plasma mass-spektromeeter laserablatsioon sisestusega. Tööpõhimõte on järgnev – proov asetatakse ablatsioonikambris, kus eemaldatakse laseriga materjali. Laser töötab vastavate nanomeetritega lainepikkusel, tootes ultravioletset energiat. Ablatsioonikraatri suurus ja ablatsiooni pikkus on muudetavad ja nendest sõltub, kui palju ühe ablatsiooniga proovist materjali eemaldatakse (Desaulty et al. 2009, 2447). Argooni abil transporditakse ableeritud materjal spektromeetrisse, kus määratakse elementide koostised.

Devos ja kolleegide 2000. aastal avaldatud töös tehti arheoloogilise kontekstiga rauast šlakipesade peal esimesed uuringud LA-ICP-MS-iga. Suurimaks edusammuks oli see, et rauadesemed on tuvastatavad teatud jälgelementide sarnasuse tõttu, mis võimaldab ka neid selle põhjal lokaliseerida (Devos et al. 2000, 879). Jälgelementide analüüs on ühildatav makroelementide mitteredutseerivate ühenditega, mistõttu on võimalik toetada makroelementidest tehtud hüpoteese (Desaulty et al. 2009, 2461).

#### 3.4.1 LA-ICP-MS sätted

Töös kasutati Taani Århus-i Ülikooli geoteaduste osakonna Resonetics 193 nm laserit Agilent technologies 7900 ICP-MS-iga ja Tartu Ülikooli Geoloogiainstituudi LSX 213 nm laserit Agilent technologies ICP-MS-iga. Agilent tarkvara oli ühendatud kaameraga, mille abil oli võimalik määrata, materjali eemaldamiseks vajaminevaid kohti. Laseri ablatsiooni läbimõõduks määrati Taanis 50 µm, ablatsiooniperioodiks 30 sekundit, paus 30 sekundit. Tartus määrati ablatsiooniperioodiks 50 sekundit. Sisestandardina kasutati Si keskmisi väärtusi, mille järgi saab hiljem andmestiku kvaliteeti kontrollida.

Mõõtmise juures kasutati Taanis standarditena BIR-1, BCR-2, BHVO-2 Ameerika basalte (Birch 2013, 85; Birch, Martinon-Torres 2015, 72). Põhjus vastavate standardite kasutamiseks oli nende homogeensus ja sellest tulenev usaldusväärsus, mis on testitud mitmete institutsioonide poolt (Birch 2013, 102). Peale selle kasutati NIST SRM 610 (Birch 2013, 85) ja 612 klaasistandardeid (Birch 2013, 101). Probleemiks NIST klaasidega, eriti 612-nega on see, et nad erinevad šlaki klaasimaatriksist ja neis sisalduvad 25 jälgelementi on suhteliselt heterogeensed (Birch 2013, 101). Tartu Geoloogiainstituudis kasutati GSD-1G ja GSE-2G basalte ning referentsina BHVO-2 basalti. Kuna Eesti rauasulatusšlakile sarnast rahvusvaheliselt tunnustatud standardit ei ole olemas, siis piirduiti eelnimetatud klaaside standarditega. Peale 10 ablatsiooni teostas LA-ICP-MS korduse standardite peal, et tulemuste korrektsust oleks võimalik kontrollida. Tuvastatavateks elementideks olid Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cd, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu,

Hf, Ta, Pb, Th ja U. Osad elemendid, nagu Re, jäeti välja, kuna nende väärtused proovides olid olematud. PCA tegemiseks kasutati BHVO-2 standardite tulemusi, kuna need on kõige stabiilsemad.

### 3.5 Andmeanalüüs

Selleks, et LA-ICP-MS-ist saadud andmed oleksid kasutatavad rakendatavates meetodites, oli vaja teostada andmereduksioon. Selleks kasutati Microsoft Excel 2016 ja sellega kaasnevat Power Query-t. Kogu andmetöötlus toimus R tarkvaraga (R core team, 2013). Peamiseks andmeanalüüsi meetodiks valiti PCA, kuna koos klasteranalüüsidega aitavad need üldisemalt tuvastada erinevate keemiliste signatuuride vahel tekkinud seoseid ja analüüsida klastritevahelist korrelatsiooni (Birch, Martinon-Torres 2015, 72). Rauda päritoluuuringute vältel on kasutatud erinevaid viise nagu LDA, HAC, mis annavad lisavõimalusi uuringute teostamiseks (L'Heritier et al. 2020, 2), kuid need jäeti käesolevas töös välja. Kõige viimatisem ja põhjalikumalt läbi mõeldud on Żabiński et al. 2020 välja töötatud meetod, mis hõlmab PCA-le ka klassifitseerijate moodustamist (Żabiński et al. 2020, 4–5).

Selleks, et aga suletud andmestik oleks kasutatav analüüsideks, on see vaja kõigepealt avada ehk transformeerida. Peamine mõte on see, et suletud andmestikus võivad tulemused anda võltskorrelatsioone, kuid avatud andmestikus seda probleemi ei esine (Birch 2013, 104). Andmestiku transformeerimiseks saab kasutada mitut transformatsiooniviisi – peamiseks on logaritmttransformatsioon (log) ja tsentreeritud logaritmttransformatsioon (clr) (Żabiński et al. 2020, 4), aga on katsetatud ka täiendlogaritmttransformatsiooni (alr) ning isomeetrilise logaritmttransformatsiooniga (ilr) (Birch 2013, 106).

Käesolevas töös teostati PCA Francois Hussoni ja tema meeskonna poolt loodud „FactoMineR“ ja „factoextra“ paketiga. Clog-transformatsiooni läbiviimiseks kasutati Gerald van den Boogaart ja tema meeskonna „compositions“ paketi clr funktsiooni. Tsentreeritud logaritmfunktsiooni transformatsiooniks kasutati järgnevat valemit (Analoogne nt Dillmann et al. 2017, 110; L'Heritier et al. 2020, 9):

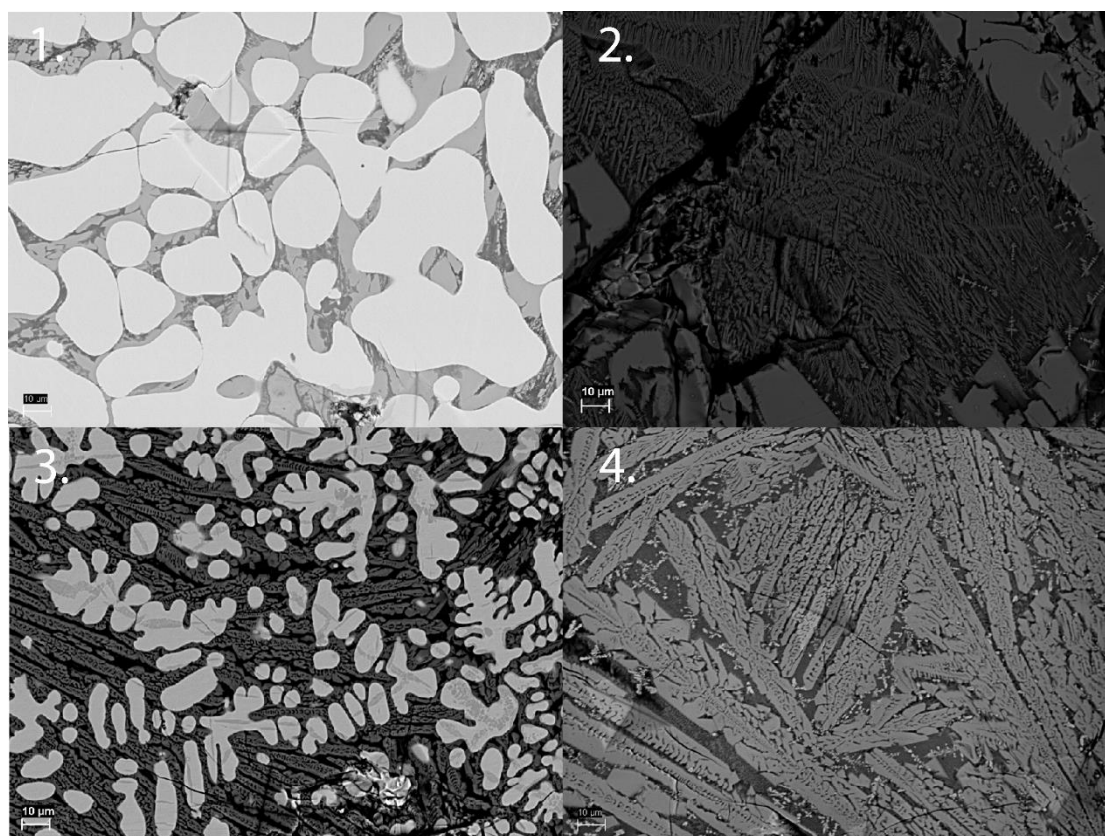
$$clr(x) := \left( \ln x_i - \frac{1}{D} \sum_{j=1}^D \ln x_j \right)_i$$

kus  $x$  on andmestiku vektori geomeetriline keskvärtus,  $D$  kui dimensionaalne eukleidiline vektor alamruumis. Kasutatud kood ja vajalik andmestik on leitavad eraldi lisade faili alt, et graafikuid oleks samade parameetrite abil võimalik taasluua.

## 4. Tulemused

### 4.1 Mikrostruktuur

Proovide mikrostruktuuris leidis erinevaid mineraale ja rauda. Olulisemateks mineraalideks olid wüstiit ja oliviini grupi fajalliit. Wüstiit esines enamasti dendriitsel kujul, kuid harva oli võimalik tuvastada seda ümarate mitte päris välja kujunenud dendriitidena. Nendest võivad tõenäoliselt mingis faasis välja areneda dendriidid või vastupidi, kuna kohati on nähe vahepealseid vorme (Jn. 3, 1). Osades proovides (Maalasti, Tarumaa) esines wüstiit eriti peenete dendriitidena klaasimaatriksis (Jn. 3, 4), mis võib olla põhjustatud teatud šlaki faasi poolt.



Joonis 3. 1. Wüstiidi vahepealsed vormid Olustvere toorraua šlakis. 2. Peened fajalliidi laastud Maalasti kaubatooriku šlakis. 3. Voolavad fajalliidi vormid Tuiu toorraua šlakis. 4. Metsamägara kaubatooriku šlakis esinev fajalliit esiplaanil ja tagaplaanil klaasimaatriksis wüstiidi dendriitne struktuur. Foto: SEM-EDS.

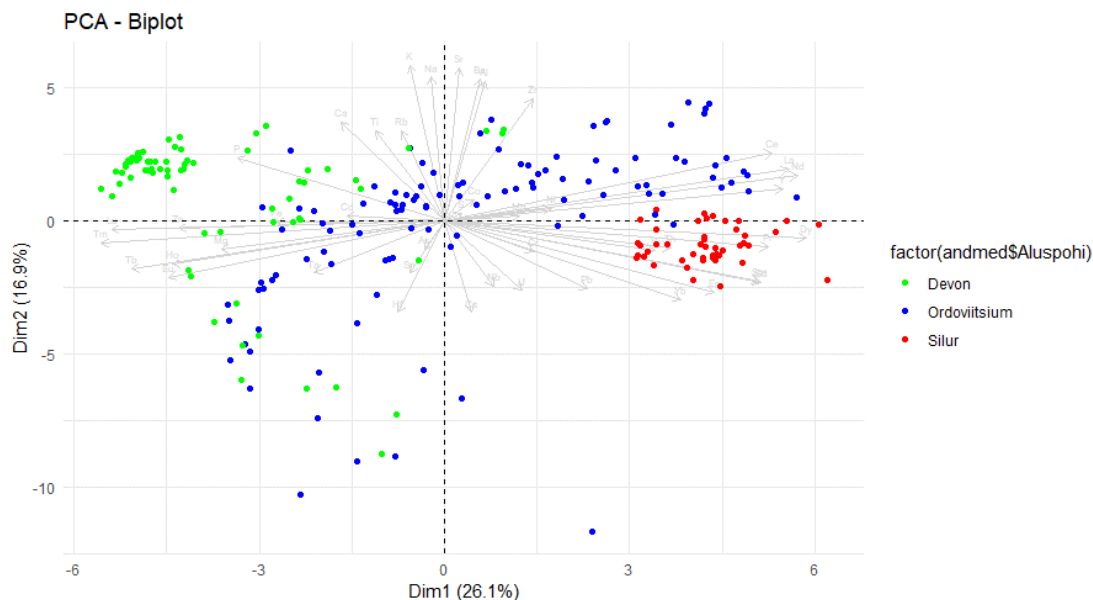
Fajalliiti esines peamiselt pikkate laastudena ja kattis tavaliselt üsna suuri pindasid. Mõningad näited (Tuiu 1, Saunakünka 4) sisaldasid fajalliiti, mis polnud struktuuri

poolest uniformne, vaid voolavam ja üksteisega tihedalt kattuv (Jn. 3, nr. 2 ja 3). Metsamägara kaubatooriku šlakis leiduv fajalliit näis võrreldes teistega hoopis erinäolisem, esinedes pikkade ja laiade laastudena. Kui tavaliselt jääb fajalliit klaasimaatriksi sisse teiste mineraalide tagaplaanile siis näitekst Metsamägara proovi fajalliit oli rohkem esil wüstiidist ja muudest mineraalidest (Jn. 3, nr. 4). Tihtipeale olid mõlemad mineraalid, nii fajalliit kui wüstiit, šlakis samal ajal erinevates kohtades esindatud, kuid osades proovides esines vaid ühte või teist. Rootsist pärit osmundi (Tarvastu) šlaki mikrostruktuuris mingeid erilisi tuvastatavaid tunnuseid polnud. Šlakk meenutas mikrostruktuurilt paljusid otsetaandamise teel toodetud näiteid, kuid wüstiit paiknes natuke korrapärasemalt. Ainuke oletatav rauakang – Kuremaa oma näitas oma šlaki mikrostruktuuris üsna standartset koostist. Fajalliit esines küll üsna ebastandartselt, kohati suurte tükkidena, kuid wüstiit oli väga tüüpiliste dendriitsete struktuuridena läbi terve proovi. Kohati leidis ka forsteriiti ( $Mg_2SiO_4$ ), larniiti ( $Ca_2SiO_4$ ) ja tefroiiti ( $Mn_2SiO_4$ ), mis arvatavasti andsid panuse Mg, Ca ja Mn väärtustesse.

Toorraua ja kaubatoorikute mikrostruktuuris oli ferriit domineerivaks struktuuriks. Rauasulatus ja esimese sepistamise käigus on saadud lahti suuremast osast šlakist ja muudest ebapuhtustest, mistõttu on raua osakaal kõige suurem. Šlakk oli säilinud kas šlakipesadena eseme sees või välispinnal. Välispinnale sattumine tuleneb sellest, et üksnes sepistamisega toorrauas esinevast šlakist lahti ei saa ja pesad säilivad isegi peale sepise voltimist ebapuhtustena. Osaliselt tuleneb see ka räbustist ja raudoksiidist. Süsinikurikkaid kohti eristada polnud võimalik, kuna proovid polnud söövitatud ühegi happega.

## 4.2 PCA

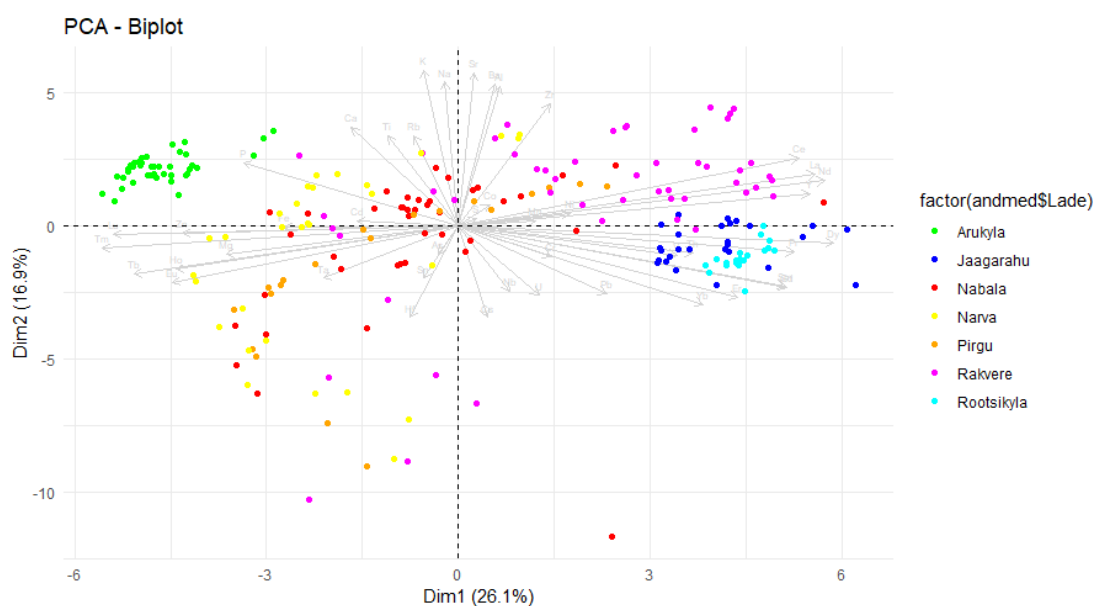
### 4.2.1 Alusjoon



Joonis 4. PCA rauasulatusšlakide elementide individuaalsetest väärtustest ja muutujatest jagatud Eesti aluspõhja settekivimite ladestute kaupa. Töötlus: Sander Jegorov

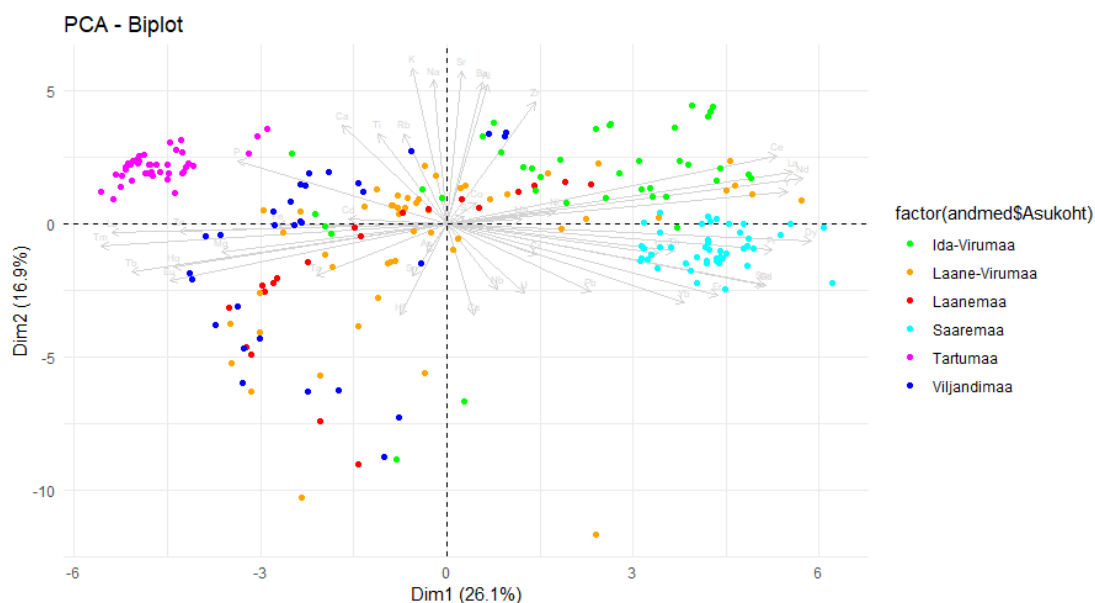
Joonis 4 on kaksikgraafik, mis näitab ainult rauasulatusšlakide elementide koostist sõltuvalt nende paiknemisest seoses Eesti geoloogilise aluspõhjaga. Ühest proovist šlaki ablatsioon võrdub ühe punktiga graafikul. Jaotuse aluseks võeti ette Eesti geoloogilise aluspõhja kaart (Jn. 9, 10), mille põhjal määrati iga rauasulatuskoht vastavasse ladestusse. Kasutatud rauasulatuskohad paiknesid vaid Devoni, Siluri ja Ordoviitsiumi ladestute peal, jättes välja Ediacara ja Kambriumi. Miks selline jaotus tehti, on seoses rauamaagi tekkega, mis hüpoteetiliselt võtab endasse elemente vastavalt geoloogilisele aluspõhjale. Sellegipoolest peab veel rõhutama, et šlakki analüüsides ei saa tuvastada, kust maaki on võetud, kuna maagi keemiline koostis ei kattu täiesti šlakiga, kuna seda mõjutab rauasulatus tehnika, kasutatud puusüsi ja savi (Blakelock et al. 2009, 1746). Keskel paiknevad nooled tähistavad elementide kogust ja nende suhet seoses andmestikuga. Mida pikem nool, seda suurem on elemendi kontsentratsioon sinna suunda ja sellele vastas olevas suunas paiknev nool on negatiivselt suhestunud teise elemendi suhtes. Tunnuselementide määramisel ladestute ja materjalide juures võeti arvesse kõige suurema punktikonstentsiooniga ala ja vaadati, millised elemendid grupi ümbrust kõige rohkem mõjutavad. Vaatluse

all oli väike osa kogu andmestikust, vaid 26,1% põhikomponent 1- (PC1) ja 16,9% põhikomponent 2 (PC2) teljest (Dim1 ja Dim2). Sellegipoolest on tuvastatavad 3 eraldi paiknevat kogumit, mis kohati ka kattuvad üksteisega. Kõige laiema ulatusega on Ordoviitsiumi grupp, mille peamiseks panustajaks on Ida-Virumaa rauasulatuskohad. Peamisteks elementideks, mis iseloomustavad Ordoviitsiumi ladestut, on Sr, Ba, Al, Zr, Ce, La, Nd ja Y suhe. Vähesemal määral on määravateks faktoriteks ka S, Co, Mn ja Ni. Kuna punktid on suhteliselt hajusalt, siis iseloomulikke elemente on tunduvalt rohkem võrreldes teiste ladestutega, nimelt osaliselt annavad oma panuse ka P, Ca, Ti ja Rb- ja Hn, Sf, As, Ta, Eu, Tb, Ho, Mg, Tm, Zn ja Fe. Devoni ladestul paiknev rauasulatuskohtade šlaki pilvegrupp on võrreldes Ordoviitsiumi kogumikuga palju tihedam. Selles esineb ka vähesel määral hajumist, kuid sellest hoolimata on olemas tuumikala, mida iseloomustavad kõrged Fe, P, Cd, Ca ja Ti suhte väärtused. Mõju avaldavad ka Ta, Eu, Tb, Ho, Mg, Tm, Zn, kuid peamiselt ainult hajutatud osale. Siluri ladestu paikneb kõige tihedamalt grupis, hajudes minimaalselt oma tuumikpilvest. Selle järelendusena on arvatavasti tegu kõige homogeensemata šlakkidega. Domineerivateks elementideks on Er, Pb, Cr, Yb, Sn, Gd, V, Th, Dy ja Mn, mis suhestuvad omavahel. Sellega on loodud alusjoon Eesti šlaki jälgelementide tuvastamiseks läbi rauasulatusüsteemide. Saadud graafiku põhjal on võimalik hakata lisama sama meetodiga tehtud raudesemeid, kus leidub šlakki, et tuvastada, millises geoloogilise aluspõhjala rauasulatusüsteemis on ese tehtud.



Joonis 5. PCA rauasulatusšlakkide elementide individuaalsetest väärtustest ja muutujatest jagatud lademetega. Töötlus: Sander Jegorov

Joonis 5 kujutab kaksikgraafikut, millel on eristajaks määratud Devoni, Siluri ja Ordoviitsiumi lademed. Rauasulatuskohad on paiknenud on Aruküla, Jaagarahu, Nabala, Narva, Pirgu, Rakvere ja Rootsiküla lademetel. Nagu ka eelmiste graafikute puhul, on PC1-l kujutatud 26,1% ja PC2-l 16,9% andmestikust. Võrreldes eelmise graafikuga on laiad üldistused Ordoviitsiumi ja ka Devoni vältel muutunud tunduvalt kitsamaks ja konkreetsemaks. Suuremaid laialivalgumisi esineb vaid Narva, Rakvere ja Nabala lademe puhul. Aruküla ladet iseloomustab kõrge P, Cd ja Fe kogus, Jaagarahu ja Rootsiküla Dy, Pr, S, Gd, Er, Yb, Rakvere Ce, La, Nd, Y, Nabala Ca, Ti, Rb, Narva Fe, Cd, P ja Pirgu ladet Ta, Eu, Ho ja Mg kogused.



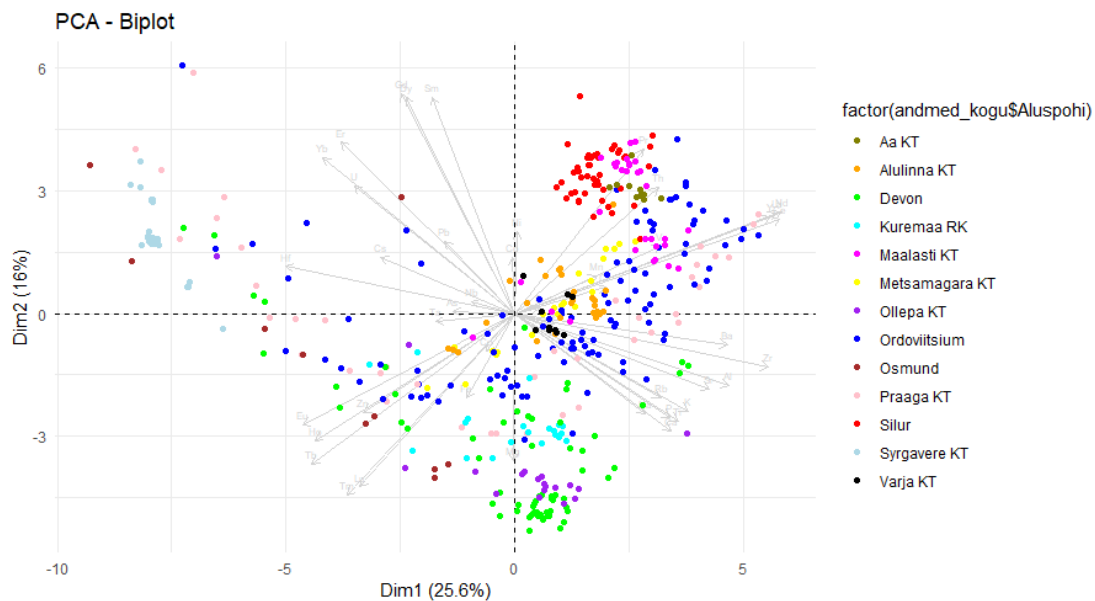
Joonis 6. PCA rauasulatusšlakkide elementide individuaalsetest väärtustest ja muutujatest jagatud maakondade kaupa. Töötlus: Sander Jegorov

Joonis 6 on punktide jaotuse aluseks on valitud maakonnad, kust rauasulatusšlakk pärineb. Mida see lisab, on näide sellest, kuidas erinevused tekivad juba maakondade vaheliselt ilma suurte geoloogiliste piiritleteta. Maakondadest on esindatud Ida-Virumaa, Lääne-Virumaa, Läänemaa, Saaremaa, Tartumaa ja Viljandimaa, mille vahel on mitmeid erinevusi. Ida-Virumaa domineerivateks elementideks Y, Nd, La, Ce, Mn, Ni, Co ja Zr juurde, mis moodustab ühe tuumikala ka Ordoviitsiumi punktivilvest. Lääne-Virumaa seisab Ordoviitsiumi alal aga natuke eraldi, omades kohati sarnaseid väärtusi Ida-Virumaale, kuid peale selle sisaldab ka Cd, P, Ca, Ti, Rb, K, Na, Sr, Ba, Al, Zr, Lu, Zn, Tm, Mg, Ho, Tb, Eu, Ta, As, Sn ja Hf väärtusi.

Läänemaa esindaja, Uugla, paikneb suhteliselt eraldi võrreldes ülejäänud Ordoviitsiumi alla kuuluvate maakondadega. Seda eristab ülejäänud Ordoviitsiumi kuuluvatest rauasulatuskohtadest mitmete elementide sisaldus: Ta, Eu, Tb, Ho, Mg, Tm, Lu, Zn, S, Co, Ni ja Ce. Saaremaa seisab Siluri alal paikneva rauasulatuskohana täiesti eraldi, olles kõige tihedamalt koos. Omasteks elementideks on Yb, Sn, Cr, Th, V, Pr, Dy, Mn ja eriti Er väärtus, mida on suuremates kogustes ainult Saaremaalt leitud šlakkides. Kuna Tartumaa oli ka eelmise graafiku Devoni peamiseks mõjutajaks, siis peegeldub see grupp ka siin. Domineerivateks elementideks jällegi Fe, P, Cd ja Ca. Tegemist on jällegi arvatavasti suhteliselt homogeense grupiga, mis eristub väga tugevalt ülejäänud punktivilvedest. Arvatavasti on ka üle Devoni aluspõhjaga aladel kujunenud maagil suhteliselt palju kohalikke erinevusi, kuid selleks oleks vajalik katta ka Kagu-Eesti. Viljandimaa, eriti just Põhja-Viljandimaa (Olustvere), paikneb Devoni ja Siluri piiril, mistõttu võib keemiline koostis palju varieeruda. Punktivilv on väga tugevalt hajutatud, kuid siiski esineb suuremaid kogumikke. Valdavalt domineerivad elementidest Ca, P, Cd, Fe, Zn, Lu, Tm, Mg, Hg, Tb, Ho, Eu ja Ta mis viitaks suuremale sarnasusele Ordoviitsiumile, kuid pigem jäävad tulemused Devoni ja Ordoviitsiumi piirile.

#### 4.2.2 Alusjoone rakendamine

Joonis 7-1 on kujutatud rauasulatusšlakkide seos geoloogilise aluspõhjaga ja sinna lisatud analüüsitud kaubatoorikud (KT), rauakang Kuremaalt (RK) ja Tarvastust pärit osmund. Kaksikgraafikul on näha protsentuaalselt väiksem osa kogu infohulgast, kui varasematel graafikutel – 25,6% PC1 teljel ja 16% andmestikust PC2 teljel. Sellest hoolimata on lisatud andmestik ühildunud hästi loodud baasjoonega ja suutnud leida elementide vahel tekkinud seosed. Informatsioon esitatakse legendi paiknemise järjekorras ja arutletakse, mis aluspõhja gruppi ning selle läbi rauasulatusüsteemi konkreetne ese kuulub. Arutelu informatsiooni kohta toimub täpsemalt tulevates peatükkides.



Joonis 7. PCA aluspinna seotusest kaubatoorikute, osmundi ja rauakangi elementidega.

Aa külast leitud kaubatoorikule on omaseks on suured Pr ja Th väärtused ja negatiivne suhe Eu, Zn, Ho, Tb, Cu ja Fe-ga. Tegemist on kohe eripärase juhtumiga, kuna Aa asub Ida-Virumaal, aga talle omased väärtused jäävad Ordoviitsiumi ja Siluri vahele. Arvatavasti on tegemist Ordoviitsiumi piirialaga, kuid ei saa välistada Silurisse kuulumist.

Alulinna kaubatooriku keemiline kompositsioon vastab Ordoviitsiumi tuumikalale, olles rikas Zr, Ba, Nd, Yr, Fe, Mn, Th, Pr ja U väärtustes. Negatiivset suhestumist elementidega on suhteliselt vähe, kuna klaster paikneb graafiku keskosas. Kui aga võtta aluseks tihedaimi gruppi osa, siis see seostub negatiivselt Eu, Zn, Tb ja Ho-ga.

Kuremaa rauakang on enda esemetüübist ainuke esindaja. Omasteks elementideks on Cu, He, Mg ja negatiivse suhestusega Cr ja Ni. Kuna Kuremaa paikneb Devoni ja Siluri aluspõhjaga piirkonna vahel, siis graafik liigitab selle hoopis Devoni ja Ordoviitsiumi vahele.

Maalasti kaubatoorikud on oma keemilise koostise poolest üksteisele suhteliselt sarnased. Olulised elemendid, mis iseloomustavad neid I kaubatoorikut (Nr 24) on Pr ja Th ning II (Nr 23) V, Mn, Yr, Nd, Fe ja U. I tooriku punktipilv sobitud rohkem Siluri kogumikku ja II Ordoviitsiumi piirialale.

Metsamägara kaubatooriku grupp sobitub üldisesse Ordoviitsiumi kogumikku, mida iseloomustavad Zr, Ba, Nd, Yr, Fe, Mn, Th, Pr ja U väärtused ja Ta, Eu, Ho, Zn, Tb, Tm ja Lu negatiivsed suhted. Grupi kattuvus on suhteliselt suur ka Alulinna punktivilvega, mistõttu sisaldavad need suhteliselt palju sarnaseid elemente.

Ollepa kaubatoorikule on omased suured Fe ja Mg-, vähesel määral Ca ja Na väärtused koostis ning negatiivsed suhted Cr ja Ni väärtustega. Punktivilv kattub peaaegu Devoni tuumikgrupiga, mistõttu mõlemate elementidevahelised korrelatsioonid keemilises koostises on tugevad.

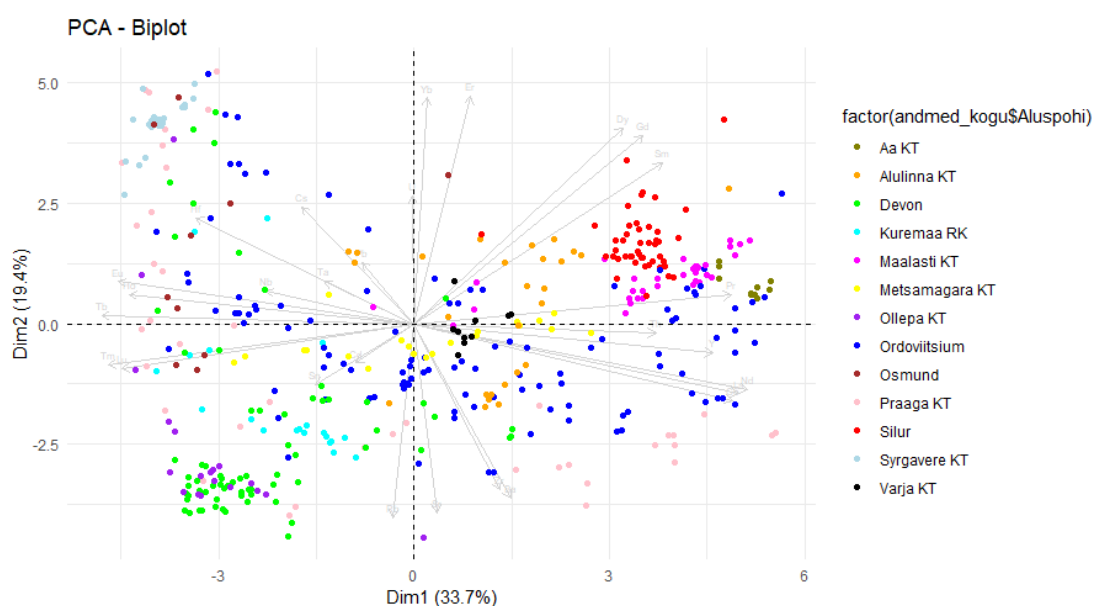
Tarvastu osmund konkreetset gruppi moodustanud ei ole, vaid on suhteliselt laialdaselt jaotatud. Põhjuseks võib olla suur varieeruvus šlaki keemilises koostises, kuid midagi põhjapanevat on raske öelda. Määravateks elementideks on As, Ta, Eu, Ho, Zn, Tb, Tm, Lu, Cu ja Fe ning negatiivne suhe Pr, Th ja Mn-iga.

Praaga kaubatoorikuid oli 2, millest mõlemad on üksteisest keemilise koostise poolest täiesti erinevad. I toorikule (Nr 18) on omaseks Mn, V, La, Nd, Yr, Ba, Zr väärtused ja negatiivsed suhted As, Ta ja Eu-ga. See paiknes ka tihedalt Ordoviitsiumi punktivilve tuumiku sees. II toorik (Nr 19) nii konkreetsetes grupis pole, hajudes laiali Ordoviitsiumi ja Devoni perifeeriasse. Omasteks elementideks on suuremas grupis Mn, Fe, Cu, Lu, Tm, Tb, Ho, Zn ja Eu. Negatiivne suhe on Mn, V, La, Nd, Yr, Ba ja Zr, mis esimesel toorikul on põhilised elemendid.

Sürgavere kaubatoorik on erijuhtumiks võrreldes teistega. Tunnuselementideks on Ta, As, Hf, Nb ja Cs ning negatiivne suhe on Ba, Zr, Al, Sr, Rb ja K-ga. See tihedalt paiknev grupp jääb Devoni ja Ordoviitsiumi grupi äärealale, kus on tegemist juba väga hajusate punktidega. Sarnasused on vaid Praaga ühe kaubatoorikuga ja Tarvastu osmundiga.

Varja kaubatoorik jääb väga tiheda üksusena Ordoviitsiumi klatri keskossa. Tunnuselementideks on Na, Ca, P, Ti, Rb, K, Sr, Al ja Zr väärtused ning negatiivne suhestuvus on U, Yb, Pb ja Er-iga.

Joonis 8-1 on kasutatud kõiki samu parameetreid nagu joonis 7-1, ainukese erandina, et sisse on jäetud vaid jälgelemendid. Nendeks on Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cd, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb, Th ja U. Käesoleval graafikul on kõige suurem kogus andmestikust – PC1 teljel 33,7% ja PC2 teljel 19,4%. Jättes välja makroelemendid, on muutunud graafikul olev punkt pilv kompaktsemaks. Üleüldised trendid on säilinud, kuid hajuvus on jäänud väiksemaks ja grupid tulnud rohkem esile. Võrreldes aga eelmise graafikuga, on ka tekkinud paar erinevust.



Joonis 8. PCA aluspinnast seotusest kaubatoorikute, osmundi ja rauakangi elementidega.

Alulinna kaubatooriku grupp on muutunud hajusamaks, kattes küll suurt osa ordoviitsiumi šlakkidest, kuid kohati asetsevad tiheda pilvena ka Siluri ladestu läheduses. Tüüpiliste elementidena lisanduvad Sm, Gd, Dy, Er, La, Ca ja vähesel määral Yb, Pb ning Cs.

Metsamägara kaubatooriku väärtused on võrreldes eelmise graafikuga samuti hajusamalt. Arvatavasti oli mingi makroelement peamiseks sidujaks ja jälgelementide kohaselt vajuvad väärtused Ordoviitsiumi peale laiali. Ühes osas on suurenenud on Cd ja Sn väärtused ja tekkinud negatiivne suhestumine Yb ja Er-iga.

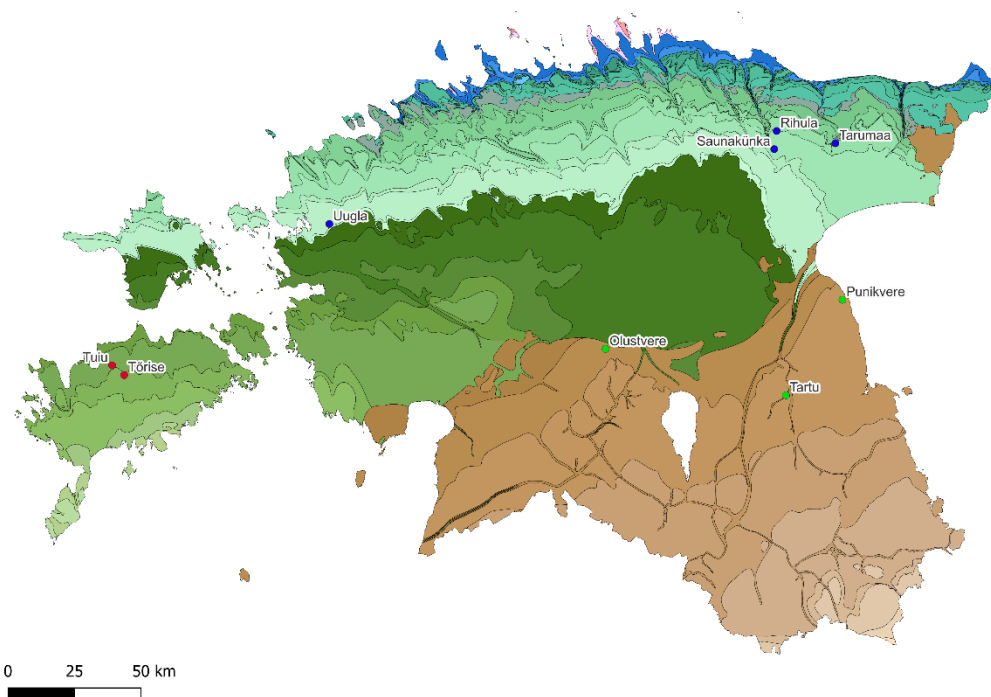
Praaga kaubatoorikud on säilitanud oma asukohad ja väärtused, kuid paiknevad vähem hajusalt. I toorik, mis varasemalt paiknes Ordoviitsiumi sees, on sealt vähesel

määral eemaldunud, kuid arvatavasti on seosed samad. II kaubatoorik on aga oma väärtustega sarnane Devoni äärealale ja sealhulgas Sürgavere kaubatoorikuga.

## 5. Arutelu

### 5.1 Rauasulatusšlaki keemilise koostise seos geoloogilise aluspõhjaga

Joonis 4 tulemused peegeldavad rauasulatusšlakide keemilises koostises väga suuri erinevusi. Arvatavasti on peamiseks põhjuseks keemilise koostise muutused vastavalt ladestule, mille pealt rauamaaki on võetud, mis on andnud edasi endale vastavad elemendid. Võttes ette Ordoviitsiumi, hõlmab see nii Ida-, kui ka Lääne-Virumaa rauasulatuskohti (nt Tarumaa, Saunakünka, Rihula), kui ka Uugla rauasulatuskohta Läänemaal. Uugla paikneb Pirgu-, Saunakünka Nabala-, ja Rihula ning Tarumaa Rakvere lademel. Tuleb välja, et see on arvatavasti omakorda veel mõjutajaks, mis määrab konkreetsemalt rauasulatusšlaki keemilise koostise. Kõige homogeensemateks osutusid Saunakünka šlakid, millele on omaseks kõrge Ca väärtus, mis võiks viidata Nabala lademe lubjakividele, mis on kandunud maaki. Rakvere lademe rauasulatuskohad – Rihula ja Tarumaa on suuremas osas ka homogeensed, sisaldades suures koguses Ce, La, Nd, Y väärtusi ja vähemal määral Ni, Mn, Co ja S. Mangaanisisaldus on oluline, kuna see aitab ühendada süsinikku paremini rauaga nagu mainitud peatükis 1.3. Arvatavasti oli sulatatud raud väga hea kvaliteediga, millest sai sepistada erinevaid esemeid. Uugla paikneb ainukese rauasulatuskohana Pirgu lademel, millele on omaseks väga mitmete elementide suured koostised. Kuna grupp on väga lai, siis on raske konkreetseid järeldusi teha, kuid ühelt poolt sisaldab Uugla rauasulatusšlakk rohkelt Ta, Eu, Tb, Ho ja teiselt Co, S ning Ce väärtusi. Väavli kogus võiks olla üheks peamiseks tunnuseks, kuid see on arvatavasti alandatud, kuna tegemist on ebapuhtusega, mis kaob enamasti maagi röstamise ajal (Birch 2013, 171).



Joonis 9. Rauasulatuskohtade paiknemine seoses geoloogilise aluspõhjaga. Pruun – Devoni ladestu, tumeroheline – Siluri ladestu, heleroheline – Ordoviitsiumi ladestu, sinine – Kambriumi ladestu, roosa – Ediacara ladestu. Alus: Maa-amet 2023. Töötlus: Sander Jegorov

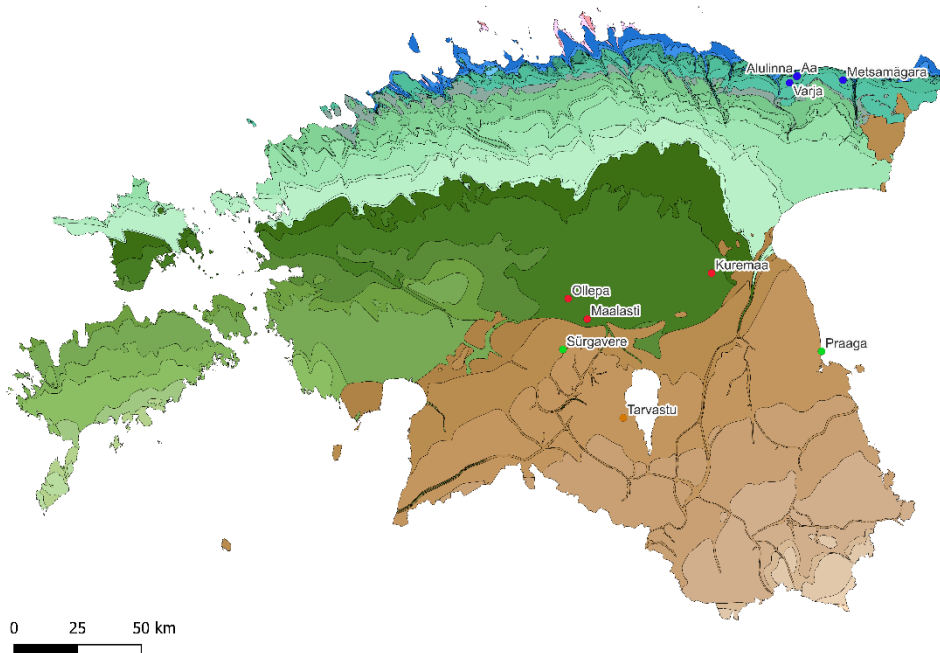
Joonis 4-jas on 2 eraldiseisvat gruppi Devoni ja Siluri näol. Devoni ladestul paiknevad Punikvere, Olustvere ja Tartu rauasulatuskohad, millest Punikvere ja Tartu on Aruküla lademel ning Olustvere Narva lademel. Aruküla lademe šlakid on väga homogeensed, kuna grupp on suuremas osas väga tihedalt. Olustverest, mis paikneb Narva lademel, on võetud 2 toorraua proovi, mis näitavad suurt erinevust keemilises koostises rauasulatuskohasiseselt. Hoolimata sellest, et peamist gruppi iseloomustavad suured P, Cd ja Fe kogused, läheb osa andmestikust kokku Rakvere lademega. Võrreldes Olustveret Aruküla lademel paiknevate rauasulatuskohtadega, on tegemist väga laialivalguva tulemusega. Üheks põhjuseks võib olla maagi toomine sisse kuskilt mujalt, mõne teise lademega alalt. See võiks viitada sellele, et Olustvere lähedal polnud head maaki saada. Ilmselt võib olla üheks teguriks kõrge fosforisisaldus. Samas on ka Aruküla lademe rauasulatuskohtade fosforisisaldus kõrge, mis pärsib seda hüpoteesi. Teiseks põhjuseks võib olla osade väärtuste tõstmine läbi rauasulatusprotsessis olevate tegurite. Nagu varasemalt mainitud, olid selleks tuhk, ahju seinad ja liiv, mis mõjutavad teatud elemente (Blakelock et al. 2009, 1746, Charlton et al. 2012, 2282).

Siluri siseselt on näha kahte väga konkreetset gruppi – Tuiu, mis paikneb Jaagarahu- ja Tõrise, mis asub Rootsiküla lademel. Mõlemil grupil on negatiivne seos fosforiga, mis näitab fosfaadivaesust. Seda on maininud ka Jüri Peets, kes väitis, et Tuiu raua fosforisisaldus on alla 0,1% (Peets 2003, 146). Põhilised erinevused esinevad Tuiu ja Tõrise vahel vaid jälgelementides. Tõrise šlakkides on rohkem Dy, Pr, Gd, Sn ja Er väärtusi, kui Tuiu omades. Kuna Tuiust on 2 proovi, siis on võimalik järeldusi teha ka rauasulatuskohtade sisestest tunnustest. Tuleb välja, et tegemist on väga homogeensete šlakkidega, mis erinevad üksteisest väga minimaalselt. Kuna fosforisisaldus on väga madal nii Tuiu kui ka Tõrise šlakkides, siis arvatavasti oli tegu väga hea kvaliteediga rauaga, millele võiks viidata ka sealne massiline tootmine.

Alusjoone loomine mitme parameetri abil – aluspõhja ladestud, lademed ja vähesel määral ka maakonnad, annab võimaluse liikuda edasi järgnevate uuringutega. On olemas baas, millele on võimalik tulevikus lisada rauast esemeid. Kuna rauasulatusšlakkide endi valim oli väike, vaid 13, siis tegelikult kaeti vaid marginaalne osa Eestist alusjoone moodustamisel. Kindlasti on tegemist kitsaskohaga, mida tulevikus peaks täiendama ja võtma materjali rohkematest piirkondadest, et saada täielikumat pilti.

## **5.2 Kaubatoorikute seosed rauasulatusšlakkidega**

Kuna rauasulatusšlakk säilib samasugusel kujul šlakipesadena ka peale sepistamist, siis rakendati alusjoont selleks, et määrata, kas kaubatoorikud on pärit sellest kohast, kus nad leiti või on nad kusagil mujal valmistatud. Selle põhjalt on võimalik teha üldiseid järeldusi esemete päritolu kohta (Lauridsen et al. 2023, 191). Lisades rauasulatusšlakkide alusjoonele kaubatoorikud, selgus, et osad kattuvad kaubaraua leiukohtade lähedal paiknevate šlakkide keemilise koostisega, aga osad mitte.



Joonis 10. Kaubatoorikute paiknemine seoses geoloogilise aluspõhjaga. Pruun – Devoni ladestu, tumeroheline – Siluri ladestu, heleroheline – Ordoviitsiumi ladestu, sinine – Kambriumi ladestu, roosa – Ediacara ladestu. Alus: Maa-amet 2023. Töötlus: Sander Jegorov

Analüüsidest joonis 7-1 kujutatud graafikut, tuleb esimene eripära Aa külast leitud kaubatoorikuga, Ida-Virumaalt. Kuigi Aa kaubatoorik leiti Ordoviitsiumi lademe alalt, on see sarnane Saaremaa Siluri keemilisele koostisele. Määravaks elemendiks on tooriumi koostis, mida Saaremaa šlakkides ei leidu ja mida Ordoviitsiumi ladestus on minimaalselt. Negatiivne suhestus on Eu, Ho, Zn ja Tb-ga, mis on samuti sarnane nii Maalasti kaubatooriku kui ka Saaremaa- ja Virumaa šlakkidega. Seetõttu on raske öelda, kas tegemist on kaubatoorikuga, mis on pärit Saaremaalt või on see valmistatud koha peal, Ida-Virumaal. Võttes ainult jälgelemendid joonis 8-1, siis eristub grupp tunduvalt rohkem, jäädes Ordoviitsiumi äärealasse. Sarnasused on jällegi Maalasti I kaubatoorikuga, mistõttu võivad need olla pärit samaga aluspõhjaga territooriumilt.

Alulinna kaubatooriku keemilise koostis, küll suhteliselt hajusalt, jääb tuumik ikkagi Ordoviitsiumi rauasulatusšlakkide keskossa. Nii tunnuselemendid, kui ka nende negatiivsed suhted jäävad Ordoviitsiumi grupiga samaks. Suures koguses on ka mangaani, mistõttu võis olla tegemist kvaliteetse rauaga. Kui vaadata ainult jälgelemente, siis need jätavad tooriku osati Ordoviitsiumi tuumikalast välja. Seetõttu

on võimalus, et tegemist on mõne Ordoviitsiumi lademega, mida töös kajastatud pole. Siiski on suur tõenäosus, et tegemist kohaliku toodanguga, mis on sulatatud Ordoviitsiumi alalt korjatud rauamaagist.

Kuremaa rauakang on järgmine fenomen, mis leiukoha järgi peaks paiknema Siluri grupis. PCA näitab aga, et keemilise koostise poolest on see hoopis sarnasem Devoni ja vähesel määral Ordoviitsiumi šlakidega. Põhjus võib ilmnedas selles, et Siluri ladestust on kaetud vaid Saaremaa osa. Kuna Siluri alalt Kesk-, Lääne- ega Ida-Eestist ühtegi rauasulatusšlakki ei võetud, siis pole teada, kui palju sealt pärit šlakide keemiline koostis suhestuks Saaremaa Siluriga ja Devoni põhjaosaga. Devonisse kuuluv Narva lade kattub suurel määral rauakangiga, mistõttu võib olla kangi jaoks raud sulatatud lõuna pool või on hoopis maak Kuremaale sisse toodud. Narva lademe tunnuseks on suur magneesiumi koostis ja negatiivne suhestumine kroomi ja nikliga. Aruküla lademega, millesse kuuluvad Punikvere ja Tartu šlakid, on aga erinevused suhteliselt suured. Jälgelementide graafik näitab suhteliselt sarnast pilti, olles eristatud Aruküla lademest ja püsides Narva lademe piirides.

Põhja-Viljandimaale kuuluva Maalasti kaubatoorikud liigituvad makro ja mikroelementide poolest kahte gruppi – I sobitub Siluri punktiple ja II Ordoviitsiumi, Rakvere lademe tuumikusse. Selle järgi on Maalasti kaubatoorikutega 2 võimalikku hüpoteesi – nimelt, kas üks on toodetud koha peal või toodud sisse Saaremaalt Siluri või hoopis Ordoviitsiumi aluspõhjaga aladelt. Säilib ka võimalus, et maaki toodi mujalt. Ainult jälgelemendid suuri erinevusi ei näita. Varasemalt täielikult Siluris paiknenud kaubatoorik on rohkem Ordoviitsiumi poole peal, kuid siiski säilitab seost Saaremaa Siluriga. Kuna Maalasti kuulub Siluri ladestu alla ja lähedalt ühtegi rauasulatuskohta leitud pole, siis arvatavasti vähemalt ühe kaubatooriku puhul on tegu sisse toodud materjaliga, kui mitte mõlema. Jällegi jääb siin kitsaskohaks see, et pole rohkematest Siluri aluspõhjaga rauasulatuskohtadest šlakki. Võimalik on ka, et kaubatoorikud on valmistatud rauasulatuskohas, mida veel siiani avastatud pole.

Metsamägara kaubatoorik jääb oma keemilise koostise poolest Ordoviitsiumi tuumikalale, nagu ka suuremas osas Alulinna kaubaraud. Mikro- ja makroelementide graafikus on grupp tihe, kuid eemaldades makroelementid, muutuvad teatud

elementide suhted. Siiski jääb valdav osa punktipilvest Ordoviitsiumi alla. Siit ka järeldus, et kuna elemendid Metsamägara ja Alulinna vahel on valdavalt sarnased, võib arvata, et mõlemad on valmistatud sarnase keemilise koostisega maagist. Seetõttu pole need kaubatoorikud arvatavasti toodud mujalt, vaid valmistatud lähipiirkondades.

Ollepa kaubatooriku leiukoht jääb Siluri aluspõhjaga vööndisse, mistõttu võiks olla selle šlaki keemiline koostis sarnane Saaremaa šlakkidega. Selle asemel paikneb tooriku grupp hoopis Devoni hulgas, täpsemalt Aruküla lademe tuumikala lähedal. Ainult jälgelemendid näitavad veel tihedamat seost Aruküla lademega, kuna punktid kattuvad veelgi tihedamalt. Seetõttu võib järeldada, et Ollepa kaubatoorik on toodud kuskil Aruküla lademel paiknevalt rauasulatuskohalt, kus see valmistati seal paiknevast maagist. Võimalus on ka, et maaki on toodud kaugemalt sisse, kuna Aruküla lade ei paikne Narva omast eriti kaugel.

Tarvastu osmund on proovidest ainuke, millel pole kujunenud graafikul konkreetset tuumikala. See võib olla seotud šlaki keemilise koostise heterogeensusega või sellega, et meetod ei töötagi kõrgahjus toodetud raua peal (Lauridsen et al. 2023, 191). Ainult jälgelemendid muudavad grupi tihedamaks, kuid siiski valgub info liialt laiali, et kindlaid järeldusi teha. Igaljuhul, PCA teostamisel ei suutnud see keemiliste komponentide vahel nii suuri seoseid leida, kui teiste proovidega.

Praaga kaubatoorikud on jällegi erijuhtum, kaks kaubatoorikut erinevad üksteisest suurel määral. I koostis kattub Ordoviitsiumi tuumikalaga, olgugi, et suhteliselt hajusalt. II tooriku koostis jääb ebaselgeks, hajudes Ordoviitsiumi, Devoni ja Sürgavere kaubatooriku gruppide juurde. Jälgelemendid suuresti pilti ei muuda – ühe tooriku koostis hajub Ordoviitsiumi piirist välja, kuid arvatavasti kuulub ikkagi Ordoviitsiumi ladestusse. Mida kindlalt saab öelda, et üks toorikutest pole kindlasti valmistatud Devoni aluspõhjalt võetud maagist. Arvatavasti on see tehtud Ordoviitsiumi aladel, kuskil Virumaal, tõenäoliselt Rakvere lademe soomaagist. Teine toorik võib olla kohalik, kuna seostus Devoniga säilis. Praaga asub küll Aruküla lademel, aga maaki võidi tuua soodest, mis paiknevad Narva lademel.

Sürgavere kaubatoorik on anomaalia võrreldes teiste kaubatoorikute ja isegi rauasulatusšlakkidega. Tegemist on väga tiheda grupiga, mis jääb täiesti ladestutest eemale, olles vaid Ordoviitsiumi ja Devoni täielikel piirialadel. Minimaalne kattuvus on ühe Praaga kaubatooriku ja Osmundiga, mis aga ei ütle palju. Tugev seos on suure hafniumi koostisega ja negatiivne seos baariumi ja tsirkooniumiga. Võimalikud on kaks järeldust – kas maak on toodud aluspõhjaga piirkonnast, kust baasjoone moodustamisel šlakki ei võetud või siis on kaubaraud pärit välismaalt. Sürgavere kaubatoorik on ka väga omanäoline oma mõõtmete poolest, kaaludes enne tükkideks raiumist oletatavalt kuni 10 kg. Võimalik, et sarnasus esineb kirvega pooleks raiatud Norras leiduva kaubarauaga (Espelund 2011, 90, 92).

Varja kaubatoorik on jällegi ideaalne näide Virumaal toodetud kaubatoorikutest. Seos Ordoviitsiumi tuumikuga on ilmne ja hajuvus minimaalne. Vaadates ainult jälgelementide graafikut, ei muutu selle proovi puhul praktiliselt midagi, olles pea sama tihedas grupis. Arvatavasti on ka Varja puhul tegemist Virumaal koha peal valmistatud rauaga, mida on tahetud kasutada ümber sepiamiseks või kaubanduses.

Üheks lisatulemuseks kaubatoorikute analüüsist, mis on küll vaid täiesti hüpoteetiline, on keemilisi signatuuride tõlgendamine potentsiaalsete avastamata rauasulatuskohtade määramiseks ja leidmiseks. Kuna osad kaubatoorikud olid võrreldes ladestuga, kus nad paiknesid, nii erinevad, siis on võimalik, et need olid tehtud veel seni avastamata rauasulatuskohas.

### **5.3 Eestisene või -väline kaubavahetus?**

Populatsioonikasv, pidevad sõjalised konfliktid ja uue rauatööstustehnoloogiaareng õhutusdүүside näol viitab sellele, et Ida- ja Kirde-Eestis ning Saaremaal hakkas 12. sajandil rauatootmine meeletu kiirusega arenema (Peets 2012, 35). Seda toetavad Tuiu-Peliso-Tõrise kompleksist leitud massiivsed šlakikuhjad, kus arvutuste järgi on toodetud vähemalt 1500–2000 tonni rauda (Peets 2003, 104). Suurt arengut on võimalik jälgida ka Rootsis, kus nii raua sulatamine, kui ka kaubandus on olnud mastaapne (Hjärthner-Holder et al. 2018, 27). Lõunapoolses Rootsis rahvasterännuajast viikingiajani oli küll madalseis, kuid tootmine kasvas järsult, mis

kestis kuni hilisrauaajani välja (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 27). Norras on arvatud, et rauatootmise kasvamine oli otseselt seotud kohaliku eliidi või pealikega, kes kontrollisid rauakaubandust (Hjärthner-Holdar et al. 2018, 28).

Ajalooliste allikate järgi on kindel, et rauast esemeid vahetati kas kohalikult või rahvusvaheliselt. Raua puhul oli väga oluline selle kvaliteet fosfori ja süsinikusisalduse seisukohalt (Charlton 2015, 211; L'Heritier et al. 2020, 1), mis pidi tingima selle, et halvema maagiga piirkondadest imporditi parema kvaliteediga rauda sisse. Kuna erinevate esemete liikumine ühest piirkonnast teise näitab inimestevahelisi suhteid ja nendevahelist kaubandusvõrgustikku (Charlton 2015, 210), siis saab väita, et süsteem on toiminud ka Eestis nii kaubatoorikute, kui ka arvatavasti raudesemetega. Viimane on eriti ilmne just rauaaja varases faasis, kus kohaliku rauasulatust veel ei osatud ning esemeid imporditi sisse lõunapoolsetelt territooriumitelt (Kriiska et al. 2020, 186–187). Kaubatoorikute (Lauridsen et al. 2023, 183) või kangide (Charlton 2015, 211) esinemine näitab selgeid standardeid kauplemiseks kasutatud materjali osas.

Eelmises peatükis toodi välja, kuidas kaubatoorikud sobituvad Eesti aluspinna keemilise koostisega ja millised erinevused nende koostises esinevad. Peale selle arutleti selle üle, kas toodang on olnud kohapealne või toodud rauda sisse. Teine arvamus oli ka see, et kaubatoorik on pärit muu aluspõhjaga alalt või hoopis välismaalt. Kuigi enamasti on kaubanduskohtade indikaatoriteks hõbedakaalud ja kaaluvihid, siis kindlasti peaks sinna hulka määrama ka sepised (Mägi 2018, 340–341), mille alla kuuluvad ka kaubatoorikud. Käesolev arutelu kaubandusest kehtib arvatavasti 11.–14. sajandi vahemiku kohta, kuna nii rauasulatuskohad, kui kaubatoorikud jäävad suures osas sellesse perioodi. Selleks, et aga täpsemaid järeldusi teha, tuleks peale Varja tooriku ka teisi dateerida.

Analüüside tulemusena valminud PCA pealt saab teha päris mitmeid tõlgendusi. Alustades Ida-Virumaalt leitud kaubatoorikutest, mis on kindlasti tehtud Ordoviitsiumi aluspõhjaga aladel ehk arvatavasti ka Virumaa rauasulatuskohtades. Aa, Alulinna, Metsamägara ja Varja on kõik suhteliselt sarnase keemilise koostisega, mistõttu on olnud rauasulatuskohas- või kohtades olnud kasutusel sarnane maak. Pole välistatud, et kõik kaubatoorikud on ühes piirkonnas tehtud. Kuna hõbeda kaubateed

on kulgenud vähemalt 8. sajandist saadik üldisemalt Eesti põhjarannikut mööda Idatee näol (Mägi 2018, 97), siis võis üheks kaubaartikliks olla raud. Kindlasti tuleb mainida ka teist fenomeni, milleks on Ordoviitsiumi kuuluva keemilise signatuuriga kaubatoorikud, mis on leitud teise aluspõhjaga territooriumilt. Nendeks on Maalasti ja Praaga, millest mõlemad asuvad kaubanduseks soodsates kohtades. Praaga paiknes Emajõe suudmes, Peipsi järve ääres ja Maalasti asub Navesti jõe kaldal, millel on ühendus Pärnu jõega. Tulemuste järgi on toimunud mingil viisil kaubandus nende aladega, mis võis olla tingitud kas Ordoviitsiumi alade heast maagist või kvaliteetse maagi ja kohapealse rauatööstuse puudumisest leiukohtade naabrusest. Kuna ei Praaga ega Maalasti lähedusest rauasulatuskohti leitud pole, siis võib olla selline teooria tõenäoline. Seetõttu võib öelda, et Eesti siseselt toimus rauakaubandus. Millistes mahtudes see aga toimida võis, on raske öelda, kuna valim on liiga väike nii suurte üldistuste tegemiseks. Samuti ei peegelda üksikute kaubatoorikute leiud kaubanduse tegelikke mahtusid. Kindel on aga see, et igas kohas polnud mõtet rauda sulatada, kuna maagis leiduvad keemilised elemendid ei soosinud seda, nagu liigne fosforisisaldus.

Devoni hulka kuuluvad teine Praaga kaubatoorik ja Kuremaa rauakang. See, et Praaga vähesel määral Devoniga kattub võib tähendada seda, et ka seal läheduses oli rauasulatuskoht. Kuna aga keemiline koostis ei kattu Aruküla lademega, siis on võimalik, et see toorik on toodud sisse kuskilt Narva lademe piirkonnast. Kuremaa rauakangi keemiline koostis jääb samuti Narva lademe tuumikusse, mistõttu on see arvatavasti valmistatud väljaspool oma leiukohta. Seepärast on mõlemad kaubatoorikud tõenäoliselt toodud sisse mitte kuigi kaugelt, mis võib olla märgiks lokaalsest kaubandusest. Ühe erandina esineb aga Ollepa, mis sobitud Aruküla lademe šlakkide tuumikusse. Kuigi Ollepa asub Siluri aluspõhjal, siis tegelikult Aruküla lade pole eriti kaugel selle avamustest. Tõenäoliselt on aga ka Ollepa kaubatoorik vähemalt mingil määral liikunud oma originaalsest tootmiskohast edasi.

Siluri rauasulatusšlakkidega väga tugevaid sidemeid ühelgi kaubatoorikul ei ole. Üks, mis on sarnane nii makro- kui ka mikroelementide poolest on I Maalasti kaubatoorik. Peamiselt tuleneb sarnasus praseodüümi kõrgest väärtusest, kuid kindlasti mängivad rolli ka makroelementid. Üks hüpotees oleks, et Maalasti kaubatoorik on toodud Saaremaalt või muudelt Siluri aladelt, kuid arvestades ainult mikroelementidega

graafikut, pole see väga tugevalt argumenteeritud väide. Seega võib olla mõlemil Maalasti kaubatoorikul rohkem seoseid Ordoviitsiumi šlakkidega, kui Siluri.

Eestivälise rauakaubanduse kohta pole võimalik praeguse infohulga juures kuigi palju öelda. Kindlasti oli võimalik, et kui Virumaal valmistati kaubatoorikuid, siis müüdi neid ka edasi. Samas aga ilmneb Sürgavere kaubatooriku keemilises koostises täielik erinevus võrreldes kõigi analüüsitud rauasulatusšlakkidega. Kas on tegemist rauasulatuskohaga, millele omast šlakki käesolevas töös ei saadud või on raud toodetud välismaal. Selleks, et teada saada, kust see kaubatoorik on pärit, oleks vaja lisada proove naabermaade rauasulatusšlakist ja võrrelda neid koostisi. Praeguses uurimisseisus võib aga väita, et Sürgavere kaubatoorik on suure tõenäosusega välismaalt sisse toodud.

Koondpildina võib väita, et Virumaa kaubatoorikud Alulinna, Metsamägara ja Varja, võivad olla valmistatud mingis tootmiskeskuses. Aa kaubatoorik on liiga erinev võrreldes teiste Virumaa kaubatoorikutega. Kuna nende keemiline koostis on väga sarnane ja kattub nii Ordoviitsiumi tuumiku, kui ka suures osas Rakvere lademe keskosaga, siis võib olla tegu sama rauasulatusüsteemiga. See võiks viitada Eestis välja kujunenud tootmisele, millele andis tõuke suurenenud rauavajadus Eesti aladel ja naabermaades. Kindlasti esines ka Eestisest kaubandust, mida soodustasid heade maakide maardlad. Rauda väliskaubandust tõestada on raske, kuid Sürgavere kaubatoorik on võrreldes teistega erinev nii oma keemilise koostise, kui ka vori poolest. Seetõttu on tõenäoline, et rauda viidi Eestist välja, kui toodi sisse.

## Kokkuvõte

Magistritöös analüüsiti rauasulatusšlakke ja kaubatoorikuid erinevatest rauasulatuskohtadest üle Eesti. Töö eesmärgiks oli luua alusjoon rauasulatusšlaki keemilisest koostisest ja kasutada seda kaubatoorikutes leiduvate šlakipesade koostisega võrdlemiseks. Eestis on tegemist esimese sellise uuringuga šlakist, mistõttu on mitmeid küsimusi selle kohta, mille baasil üldse mingeid varieeruvusi otsida tuleks. Sobilikuks osutusid erinevused šlakide keemilises koostises sõltuvalt geoloogilise aluspõhja erinevustest, mis sõltusid nii eri ladestutest, kui ka lademetest. Kuna aluspõhjast tulenevalt võtab rauamaak endasse erinevaid keemilisi elemente, siis võeti see hüpoteetiliseks võimaluseks, mida rakendada omapärade leidmiseks.

Rauasulatusšlakid ja kaubatoorikud valmistati ette mikrolihvidena. Kogu valim oli 26 proovi, millest 13 olid rauasulatusšlakid. Keemilise kompositsiooni mõõtmiseks kasutati SEM-EDS-i ja LA-ICP-MS-i, millest esimese ülesandeks oli makroelementide analüüs ja teise jälgelementide koostise teadasaamine. Kokku kasutati mõõtmise tulemusena 44 elementi 45-st, kuna reenumi väärtused olid negatiivsed. Ainult jälgelementide graafiku tegemisel jäeti kasutuseks vaid 28 elementi. Andmete visualiseerimisel kasutati R tarkvara, millega koostati PCA.

Tulemused näitavad laialdasi erinevusi vastavalt aluspõhjale, mis ilmnesid nii Ordoviitsiumil, Siluril kui ka Devonil paiknevate rauasulatuskohtade šlakidel. Kui eraldada ladestud veel lademete kaupa, siis eristusid igas grupis ka veel omakorda punktipilvede kontsentratsioonialad. Näiteks Devoni ladestu Aruküla ja Narva lademe šlakid eristusid üksteisest. See näitab, et aluspõhjadel lasuvate rauasulatuskohtade maagid on üksteisest väga erinevad ja seetõttu hästi eristuvad. Igal lademe rauasulatuskohtade šlakidel olid elemendid, mis neid iseloomustasid ja millega need negatiivselt suhestusid. Eristus tehti ka maakondade baasil, mis näitasid kohati sarnast pilti geoloogiliste ladestute ja lademetega.

Lisades kaubatoorikud alusjoonele, avas see mitmeid tõlgendamisvõimalusi. Suur osa kaubatoorikutest olid suhteliselt sarnased oma leiukoha aluspõhja keemilisele koostisele. Osad kuulusid aga hoopis teise aluspõhja keemilise koostisega paremini

kokku. Näiteks Maalasti ja Praaga kaubatoorikud, mis peaksid asukoha järgi kuuluma Siluri ja Devoni ladestute šlakkidega kokku, olid hoopis sarnased Ordoviitsiumiga, mistõttu võidi need valmistada hoopis territooriumil, mis ulatub Läänemaalt Ida-Virumaani. Sarnane muster oli ka mitmetel teistel kaubatoorikutel, nagu Ollepa ja Kuremaa, mis Siluri asemel kuulusid Devoni alla. Küsimuse all oli ka Ida-Virumaalt, Aa külast pärit kaubatoorik, millel oli sarnasus Siluri alla kuuluvate šlakkidega.

Kinnitati ka, et kõrgahjus toodetud raua šlakk on keemilise koostise poolest palju heterogeensem, kui otsetaandamisel toodetud šlakk. Arvatavasti on see mõjutatud valmistamisviisist, kuna kõrgusahjus toodetud malm sulatati süsinikusisalduse alandamiseks veel ühe korra üles.

Arutelus mindi süvitsi erinevate tõlgendusvõimalustega, mis põhikomponendianalüüsiga oli võimalik tuvastada. Diskussiooni alla sattusid mitmed küsimused. Üks võimalik teooria oli, et osade kaubatoorikute valmistamisel on võetud maaki teise aluspõhjaga territooriumilt võrreldes leiukohaga. Veelgi, arutati, millised kaubatoorikud võisid olla tehtud kohalikult ja millised toodud muu aluspõhjaga alalt sisse. Olustvere rauasulatuskoha toorraua šlakk näitas mõlema keemilises koostises erinevaid tulemusi, millest järeldati, et sinna võidi tuua maaki tuua. On ka võimalik, et kasutati rauasulatusel ajal erinevaid meetodeid, näiteks kasutati teise puidu sütt põletamisel või savi ahju ehitamisel, mille tõttu võis ka keemiline koostis eristuda. Peale selle arutleti Sürgavere kaubatooriku päritolu üle, mis erines täiesti oma keemilise koostise poolest teistest, mistõttu võib olla see toodud väljaspoolt Eestit. Analüüsides käigus avastati, et Virumaal, või vähemalt Ordoviitsiumi aluspõhjaga alal, oli välja kujunenud kaubatoorikute tootmiskeskus. Kuna mitmed Ida-Virumaalt leitud kaubatoorikud näitasid Ordoviitsiumi šlakkidega ja üksteise šlakipesadega sarnast keemilist kompositsiooni, siis üks tõlgendusvõimalus on, et tegemist on kaubateega seotud materjaliga, mis võisid minna müügiks. Rohkem oli aga märke Eestisisesest kaubandusest, mille indikaatoriks olid Ollepalt, Kuremaalt, Maalastist ja Praagalt pärit kaubatoorikud. Kuna ükski neist ei sobitunud selle aluspõhja šlaki keemilise koostise alla alla, kuhu nad leiukoha järgi kuulusid, siis võib sellest järeldada, et nende valmistamisel kasutatud maak on võetud teise geoloogilise aluspõhjaga territooriumilt ja arvatavasti valmistatud ka seal.

Tegemist uuringuga, millega on võetud esimesed sammud rauasesemete päritolu uurimise poole. Kõigepealt tuleks võrdluseks koguda rohkematest rauasulatuskohtadest šlakki, et katta ära suurem territoorium. Kuna Eestis on geoloogilise aluspinna erinevused lühikeste vahemaade tagant väga suured, siis on sellest lähtuvalt vaja ka materjali koguda. Uuritud rauasulatuskohad peaksid ideaalis katma terve geoloogilise ladestu, läbi mille oleks võimalik näha kõige rohkem variatsioone. Sellegipoolest on käesolev töö loonud tugeva vundamendi, millelt edasi liikuda ja mida võiks ka tulevikutööde käigus kasutada.

## Kasutatud kirjandus

### Käsikirjad

**Blehner, M. A.** 2023. Tartu Lossi 3 ahjude 7/8, 20, 22 ja 26 šlaki- ja rauatükkide metallograafiline analüüs. Materjaliuuringu aruanne.

**Kiudsoo, M.** 2017. Kaubatoorikute peitvara Ida-Virumaalt, Aa külast. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

**Kiudsoo, M.** 2018. Rauast kaubatoorikute peitvara Varjast, Ida-Virumaalt. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

**Saage, R.** 2022. Eksperdi hinnang Virumaalt Metsamägara külast leitud raudkangi kohta. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

**Saage, R., Tvauri, A.** 2019. Eksperdi hinnang 2019. aastal Praagalt leitud esemete kohta. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

**Sikk, K.** 2017. Aruanne arheoloogilisest leirest LIFEME projekti Sirtsu soo taastamisalal. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

### Publikatsioonid

**Anteins 1962 = Антейн, А.** 1962. Наконечники копий из сварочной узорчатой (дамасской) стали, найденные в Эстонии. Известия академии наук Эстонской СССР 1962(4), 307–362

**Anteins, A.** 1976. Melnais metals Latvija. Riia: Zinātne.

**Bachmann, H-G.** 1982. The identification of slags from archaeological sites. University College London Institute of Archaeology Publications Vol. 28. Occasional Publication, 6.

**Benvenuti, M., Dini, A., D’Orazio, M., Chiarantini, L.** 2013. The tungsten and tin signature of iron ores from Elba Island (Italy): a tool for provenance studies of iron production in the Mediterranean Region. – *Archaeometry*, 55(3), 479–506.

**Bertašius, M., Navasaitis, J., Selskienė, A., Žaldarys, G.** 2010. Marvelės Kapinyno Geležies Dirbinių Metalografiniai, Mechaninių Savybių ir Elementinės Sudetės Tyrimai. – *Lietuvos Archeologija*, 2010, 153–182.

**Birch, T.** 2018. Standardised Manufacture of Iron Age Weaponry from Southern Scandinavia: Constructing and Provenancing the Havor Lance. – *Prehistoric Warfare and Violence*, 247–276.

**Birch, T., Martinon-Torres, M.** 2015. The iron bars from the ‘Gresham Ship’: employing multivariate statistics to further slag inclusion analysis of ferrous objects. – *Historical Metallurgy* 48, 69–78.

**Blakelock, E., Martinon-Torres, M., Veldhuijzen, A. H., Young, T.** 2009. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. – *Journal of Archaeological Science*, 36, 8, 1745–1757.

**Buchwald, V. F.** 2008. Iron, Steel and Cast iron before Bessemer. *Historisk-filosofiske Skrifter* 32, The Royal Danish Academy of Science and Letters.

**Buchwald, V. F., Wivel, H.** 1998. Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Objects. – *Materials Characterization*, 40(2), February 1998, 73–96.

**Charlton, M. F.** 2015. The last frontier in ‘sourcing’: the hopes, constraints and future for iron provenance research. – *Journal of Archaeological Science* 56, 210–220.

**Charlton, M. F., Blakelock, E., Martinon-Torres, M., Young, T.** 2012. Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods. – *Journal of Archaeological Science* 39, 7, 2280–2293.

**Coustures, M-P., Béziat, D., Tollon, F., Domergue, C., Long, L., Rebiscoul, A.** 2003. The use of trace element analysis of entrapped slag inclusions to establish ore-bar iron links: Examples from two Gallo-Roman iron-making sites in France (Les Martys, Montagne Noire, and Les Ferrys, Loiret). – *Archaeometry*, 45(4), 599–613.

**Cresswell, G. R.** 1992. Radiocarbon Dating of Iron Artifacts. – *Radiocarbon*, 34(03), 898–905.

**Daly, A., Jouttijärvi, A., Jensen, L. M. S., Nicolajsen, T., Ravn, M.** 2021. The Vordingborg Boat: Investigation, Presentation and Interpretation of a 14th-Century Boat-Find from Vordingborg Castle, Denmark. – *International Journal of Nautical Archaeology* 50, 1, 1–19.

**Desaulty, A. M., Dillmann, P., L'Heritier, M., Mariet, C., Gratuze, B., Joron, J.-L., Fluzin, P.** 2009. Does it come from the Pays de Bray? Examination of an origin hypothesis for the ferrous reinforcements used in French medieval churches using major and trace element analyses. – *Journal of Archaeological Science* 36, 2445–2462.

**Devos, W., Senn-Luder, M., Moor, C., and Salter, C.** 2000. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for spatially resolved trace analysis of early-medieval archaeological iron finds. – *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 366, 873–880.

**Dillmann, P., Schwab, R., Bauvais, S., Brauns, M., Disser, A., Leroy, S., Gassmann, G., Fluzin, P.** 2017. Circulation of iron products in the North-Alpine area during the end of the First Iron Age (6th-5th c. BC): a combination of chemical and isotopic approaches. – *Journal of Archaeological Science*, 87, 108–124.

**Erb-Satullo, L. N., Walton, T. J.** 2017. Iron and copper production at Iron Age Ashkelon: Implications for the organization of Levantine metal production. – *Journal of Archaeological Science Reports*, 15, 8–19.

**Espelund, A.** 2011. Norway as a Bloomery Iron Producer. The Archaeometallurgy of Iron. Recent Developments in Archaeological and Scientific Research. Prague: Institute of Archaeology of ASCR, Prague, 87–98.

**Fischer, P. M., Bürge, T.** 2017. "Sea Peoples" Up-To-Date : New Research on Transformations in the Eastern Mediterranean in the 13th-11th Centuries Bce. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

**Gautiger, H.** 2001. Luminescence dating of archaeometallurgical slag: use of the SAR technique for determination of the burial dose. – Quaternary Science Reviews 20, 2001, 973–980.

**Girão, V. A., Caputo, G., Ferro, C. M.** 2017. Application of Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS). Characterization and Analysis of Microplastics, 75, 154–166.

**Haustein, M., Roewer, G., Krbetschek, M. R., Pernicka, E.** 2003. Dating Archaeometallurgical Slags Using Thermoluminescence. – Archaeometry, 45(3), 519–530.

**Hjärthner-Holdar, E.** 1993. Järnets och Järnmetallurgins Introduktion I Sverige. Societas Archaeologica Upsaliensis, 1993.

**Hjärthner-Holdar, E., Grandin, L., Sköld, K., Svensson, A.** 2018. By Who, for Whom? Landscape, Process and Economy in the Bloomery Iron Production AD 400–1000. – Journal of Archaeology and Ancient History, 21, 1–49.

**Hjärthner-Holdar, E., Risberg, C.** 2009. Technology of Iron: Choices and Innovation. – Materials and Manufacturing Processes. Taylor and Francis Group, LLC, 981–986.

**Jaanits, L., Laul, S., Lõugas, V., Tõnisson, E.** 1982. Eesti esiajalugu. Tallinn: Eesti Raamat.

**Jegorov, S., Saage, R., Oks, K., Sikk, K.** (*Ilmumisel*). The Iron Smelting Complex of Rihula. – Archaeological Fieldwork in Estonia, 2023.

**Johanson, K., Kriiska, A., Aruväli, J., Somelar, P., Sikk, K., Sepp, L.** 2021. Local or imported? Tracking the provenance of the flint raw material of the Mesolithic habitants of Estonia and Northern Latvia with the help of geochemical methods. Holocene Foragers in Europe and Beyond (Papers Presented the Ninth International Conference on the Mesolithic in Europe MESO 2015, Belgrade, Serbia. Belgrade, Oxford: Serbian Archaeological Society, Oxbow Books, 123–128.

**Jouttijärvi, A., Voss, O.** 2011. The oldest iron smelting furnaces in Denmark. Archaeometallurgy of Iron. Recent Developments in Archaeological and Scientific Research. Prague: Institute of Archaeology of ASCR, Prague, 55–64.

**Jouttijärvi, A.** 2013. Iron and processes in Scandinavian blacksmithing workshops from the Iron Age to the 14th century. The World of Iron. London: Archetype, 402–408.

**Kiudsoo, M., Mäll, J., Kallis, I.** 2009. Archaeological Excavations on the Iron-Smelting Site in Tõdva Village. – Archeological fieldwork in Estonia, 2008, 96–103.

**Kiudsoo, M., Tamla, Ü.** 2017. New hoards from Voorepera, Eastern Virumaa. – Archeological fieldwork in Estonia, 2016, 75–80.

**Kolchin 1953 = Колчин, Б. А.** 1953. Чёрная металлургия и металлообработка в древней руси (домонгольский период). Москва: Материалы и исследования по археологии СССР, No. 32.

**Kriiska, A., Lang, V., Mäesalu, A., Tvauri, A. & Valk, H.** 2020. Eesti ajalugu I. Eesti esiajalugu. Tartu Ülikooli Ajaloo ja Arheoloogia Instituut, Tartu.

**Kriiska, A., Oras, E., Lõugas, L., Meadows, J., Lucquin, A., Craig, E. O.** 2017. Late mesolithic Narva stage in Estonia: Pottery, settlement types and chronology. – Estonian Journal of Archaeology, 2017, 21(1), 52–86.

**Lang, V.** 2006. Research into Bronze and Early Iron Ages. Archaeological Research in Estonia 1865–2005. Tartu: Tartu University Press, 77–104.

**Lang, V.** 2007. Baltimaade pronksi- ja rauaaeg. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

**Lauridsen, K. L., Zolbin, A. M., Birch, T.** 2023. Iron and slag. – Northern Emporium, 2023, 2: The networks of Viking-age Ribe. Chapter: 11. Aarhus University Press

**Lauringson, A.** 1995. Eesti raua radadel. Rauaraamat. Tallinn.

**Lavento, M.** 1999. An Iron Furnace from the Early Metal Period at Kitulansuo in Ristiina, in the Southern Part of the Lake Saimaa Water System. – Fennoscandia Archaeologica, XVI (1999), 75–80.

**L'Heritier, M., Dillmann, P., Guillame, S.** 2020. Deciphering the Iron Provenance on a Medieval. Building Yard: The Case of Bourges Cathedral. – Minerals 10(12):1131, 1–21.

**Loftsgarden, K.** 2019. The prime movers of iron production in the Norwegian Viking and Middle Ages. – Fornvännen, 114(2), 75–87.

**Mandel, M.** 2022. Läänemaa muinasajast Lihula keskaega. Tallinn: SA Eesti Ajaloomuuseum.

**Milot, J., Poitrasson, F., Baron, S., Coustures, M-P.** Iron isotopes as a potential tool for. ancient iron metals tracing. – Journal of Archaeological Science 76, 2016, 9–20.

**Mohammed, A., Abdullah, A.** 2019. Scanning Electron Microscopy (SEM): A review. Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX, 1–9

**Moilanen, M.** 2015. Marks of Fire, Value and Faith: Swords with Ferrous Inlays in Finland During the Late Iron Age (ca. 700-1200 AD). Turku: Suomen Keskiajan Arkeologian Seura/Sällskapet för Medeltidsarkeologi i Finland.

**Mäesalu, A., Valk, H.** 2006. Research into the Late Iron Age. – Archaeological Research in Estonia 1865–2005. Tartu: Tartu University Press, 127–158.

**Mägi, M.** 2018. In Austrvegr: The Role of the Eastern Baltic in Viking Age Communication across the Baltic Sea. *The Northern World*, 84. Brill.

**Navasaitis, J., Selskienė, A.** 2007. Iron smelting techniques in the Virbaliūnai ancient settlement. – *Archaeologia Baltica*, 2007, 387–394.

**Navasaitis, J., Selskienė, A., Žaldarys, G.** 2010. The Study of Trace Elements in Bloomery Iron. – *Materials Science*, 16(2), 2010, 113–118.

**Oras, E., Kriiska, A.** 2014. The Kohtla Weapon Deposit: Preliminary Results. – *Archeological fieldwork in Estonia*, 2013, 55–66.

**Peets, J.** 1991. Eesti rauast muinasajal. – *Arheoloogiline kogumik*. MT, 1, 92–100.

**Peets, J.** 2003. The Power of Iron. Iron production and blacksmithy in Estonia and neighbouring areas in prehistoric period and the Middle Ages. *Muinasaja Teadus*, 12. Tallinn.

**Peets, J.** 2012. Muistsete rauaahjude jäänustest Mäetaguse Metskülas ja Eesti omamaise raua sünnist. *Iisaku Muuseumi Toimetised*. Iisaku: Iisaku Muuseum, 34–58.

**Pleiner, R.** 2000. Iron in archaeology: the European bloomery smelters. Prague: Archeologický ústav AV ČR.

**Pleiner, R.** 2006. Iron in archaeology: early European blacksmiths. Prague: Archeologický ústav AV ČR.

**Price, T. D., Peets, J., Allmäe, R., Maldre, L., Price, N.** 2020. Human remains, context, and place of origin for the Salme, Estonia, boat burials. – *Journal of Anthropological Archaeology*, 58, 1–13.

**R Core Team.** 2013. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

**Rundberget, B.** 2017. Tales of the Iron Bloomery Ironmaking in Southeastern Norway: Foundation of Statehood c. ad 700–1300. Leiden: Brill.

**Rundberget, B., Vasks, A., Gundersen, I. M., Brūzis, R., Larsen, J. H., Bebre, V., Doniņa, I., Vīksna, A.** 2020. Bloomery ironmaking in Latvia: a comparative study of Iron Age and medieval technologies. – *Journal of the Historical Metallurgy Society*, 2018, 52 (2), 96–109.

**Saage, R., Peets, J., Tiidu, E., Maldre, L.** 2015. New Research Results From the Smithy Site of Käku in 2013–2014. – *Archeological fieldwork in Estonia, 2014*, 193–204.

**Saage, R., Kiilmann, K., Tvauri, A.** 2018a. Manufacture Technology of Socketed Iron Axes. – *Estonian Journal of Archaeology*, 22(1), 51–65.

**Saage, R., Peets, J., Kulu, P., Peetsalu, P., Viljus, M.** 2018b. Metallographic investigation of iron blooms and bars from the smithy site of Käku, Estonia. – *Fennoscandia archaeologica XXXIV*, 2017, 46–58.

**Saage, R., Johanson, K., Rannamäe, E., Jegorov, S., Haak, A.** 2022. The settlement site of Maalasti: crafts from the Mesolithic to the Medieval Times. – *Archeological fieldwork in Estonia, 2022*, 65–76.

**Saage, R.** 2020. Metallitööpaigad Eestis 7.–17. sajandil. (PhD Thesis). University of Tartu, Estonia.

**Schwab, R., Heger, D., Höppner, B., Pernicka, E.** 2006. The provenance of iron artefacts from Manching: A multi-technique approach. – *Archaeometry*, 48, 433–452.

**Selirand, J.** 1975. Estnische Gruppe der nordeuropäischen Lanzenspitzen mit damasziertem Blatt. – *TATÜ* 24(2), 171–186

**Stankus, J.** 1996. Iron Blooms in Lithuania. The Importance of the Ironmaking. Technical Innovation and Social Change II. Papers presented at the Norberg Conference on May 8–13, 1995. Stockholm: Jernkontorets Bergshistoriska Utskott, 57–62.

**Stenvik, L, F.** 2003. Iron Production in Scandinavian Archaeology. – *Norwegian Archaeological Review*, 36(2), 119–134.

**Thiele, Á., Hošek, J.** 2015. Estimation of Phosphorus Content in Archaeological Iron Objects by Means of Optical Metallography and Hardness Measurements. – *Acta Polytechnica Hungarica*, 12(4), 2015, 113–126

**Tvauri, A.** 2006. Investigation of the Middle Iron Age. – *Archaeological Research in Estonia 1865–2005*. Tartu: Tartu University, 105–126.

**Tõrv, M.** 2016. Persistent Practices. A multi-disciplinary study of hunter-gatherer mortuary remains from c. 6500–2600 cal. BC, Estonia. (PhD Thesis). University of Tartu, Estonia.

**Valk, H., Saage, R., Oks, K., Sammler, S.** 2022. Archaeological excavations in Tarvastu, castle of the Teutonic Order. – *Archaeological Fieldwork in Estonia 2021*, 113–128.

**Zavyalov, V.** 2011. Archaeological metallography in Russia: historiographic notes. The Archaeometallurgy of iron. Recent Developements in Archaeological and Scientific Research. Prague: Institute of Archaeology of the ASCR, 199–210.

**Žalnierius, A., Navasaitis, J., Balčiūnas, D.** 2007. The iron smelting site in Virbaliūnai ancient settlement. – *Archaeologia Baltica*, 2007, 377–386.

**Żabiński, G., Gramacki, J., Gramacki, A., Mista-Jakubowska, E., Birch, T., Disser, A.** 2020. Multi-classifier majority voting analyses in provenance studies on iron artefacts. – *Journal of Archaeological Science*, 113, 2–15.

## **Summary: Provenance analysis of Estonian archaeological iron**

The main aim of the masters thesis was to perform provenance analysis on different iron smelting slags and currency blooms from various parts of Estonia. The slags were chosen from iron smelting sites to increase the probability of them being iron smelting slags. Since the chemical composition of iron smelting slags remains the same after smelting and smithing (as slag inclusions), different methods for provenancing could be applied (Blakelock et al. 2009, 1746).

The research questions were the following:

1. What are the differences in chemical composition of iron smelting slags in regards to the geological bedrock?
2. Are Estonian „iron smelting systems“ indentifiable by the chemical composition?
3. Does the chemical composition of slag inclusions inside currency bars show any signs of local or foreign trade?
4. Is bloomery iron similar in chemical composition to blast furnace iron?

Previously not much research has been done in Estonia considering provenancing. Lithic (Johanson et al. 2021) and Sr isotopes in human bones (Price et al. 2020) have been explored but not much beyond that. In Denmark, Germany and France the topic has been of great interest and due to that multiple works considering different contexts (Schwab et al. 2006; Charlton et al. 2012; Birch 2013; L’Heritier et al. 2020; Lauridsen et al. 2023). The methods have been improved drastically since the inception of them and many more statistical analyses have been implied to determine the composition with more accuracy and prowess (Żabiński et al. 2020). One of the more important revelations has been the usage of LA-ICP-MS for trace elements (Devos et al. 2000) which has also been integrated in the latest analyses (Birch 2013; L’Heritier et al. 2020). Since then the use of macro- and trace elements has been essential for the success of the method (Birch 2018, 267; L’Heritier et al. 2020, 8).

Beyond slags, the research material incorporated currency blooms which have a history of being one of many tradeable materials in the north (Loftsgarden 2019, 76,78). Since they were used for trade there is a possibility that some of the currency bars were brought in from neighbouring lands. Since the eastern trading way, Austrvegr, runs from the northern coast of Estonia (Mägi 2018, 97), the possibility of a long distance trade for iron goods isn't too far fetched.

The aim of the thesis was to measure the chemical composition with SEM-EDS and LA-ICP-MS and create a base line with iron smelting slags. For that, a principal component analysis (PCA) was applied to perform a graph in Euclidean space. Afterwards the results were divided by geological bedrock regarding where the iron smelting site was located and where possibly the ore was collected from. Since the bedrock is associated with the formation of the bog ore then it applies some of its chemical consistency to the ore.

The samples were prepared with different methodological approaches, carbon coated and analysed with SEM-EDS for macroelements. The bulk composition was mostly measured for the average value of silica to apply it in the LA-ICP-MS analyses. Macroelements aren't most suitable for provenance since they aren't affected as much by the local geology (Lauridsen et al. 2023, 191).

The results of the dual analysis of SEM and LA-ICP-MS were successful. The baseline PCA was done with multiple variables in mind – firstly the geological bedrock system, secondly the bedrock stage and thirdly the counties. Only iron smelting slags were used for the baseline so information of chemical composition would most certainly be only local. Three different groups with many similarities and some differences appeared – Ordovician, Silurian and Devonian. Ordovician was chemically most heterogenous and Devonian most homogenous. The geological bedrock stages provided much needed compaction of the groups, especially Silurian and helped to be more precise about the localization.

It was also confirmed that blast furnace iron slag was much more heterogenous compared to the bloomery iron- and smelting slag. That is most likely due to the smelting process, in which blast furnace iron is liquidated and bloomery iron is not.

The discussion dwells into the possible interpretations of local and foreign trade, trading- and even production centres. The possibility of local trade is shown by multiple currency blooms which were found from Praaga, Ollepa, Maalasti and Kuremaa. The chemical composition is indicative of slags from different bedrock zones. Most likely the blooms were traded for example from Ida-Virumaa. There also exist the possibility that if no good bog ore was available in the vicinity of smelting site, it could have been brought from further away. For example there are inter-site differences in chemical composition of two smelting slags from Olustvere. The variability shows that maybe distinct methods were implied during the smelting or ores from other bedrock zones were used. There was also the question of currency bar from Sürgavere which had completely different chemical composition compared to the baseline and other currency blooms. Most likely that is due to Sürgavere bloom not being made in Estonia or the slags used for the baseline didn't provide enough variability. Since Sürgavere bloom is so different to others it could be similar to for example Norwegian counterparts. That might be an indicator of foreign trade of currency blooms. Another hypothesis was that there have been centres for making currency blooms. For example the blooms found from Metsamägara, Alulinna and Varja share similar chemical consistence. The blooms were possibly made in the same iron smelting site and gathered for trading.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Sander Jegorov,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Eesti arheoloogilise raua päritoluanalüüs/Provenance analysis of Estonian archaeological iron,

mille juhendaja on Ragnar Saage,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Sander Jegorov*

**10.05.2023**