Rauauuringute kolm põhilist küsimust: eseme materjal, valmistamistehnoloogia ja päritolu

Ragnar Saage

Resümee

Artikkel käsitleb rauauuringute kolme põhiküsimust: rauast esemete materjali koostise määramine, valmistamistehnoloogia rekonstrueerimine ning päritolu tuvastamine. Kuigi raua äratundmine materjalina on suhteliselt lihtne, nõuavad detailsemad uuringud keerukamaid analüüsimeetodeid. Kõige olulisemaks peetakse metallograafiat, mis võimaldab uurida sulami koostist, lisandeid, süsinikusisaldust, kuumtöötlust ja sepistamistehnikaid, kuid eeldab sageli esemete osalist kahjustamist. Artikkel annab ülevaate metallograafia arengust ning selle sidumisest tänapäevaste uurimismeetoditega. Eesti näidete põhjal analüüsitakse soomaagist toodetud raua omadusi, mis on enamasti madala süsinikusisaldusega, ning arutletakse terase tootmise võimaluste üle. Samuti käsitletakse malmi ja meteoriitrauda. Metallograafia abil saab mõista ka sepistamise protsesse ja tehnoloogiat. Päritolu-uuringutes kasutatakse eeskätt räbujäänuste keemilist analüüsi, sidudes esemeid konkreetsete tootmispiirkondadega ning uurides kaubandus- ja tootmisvõrgustikke.

Märksõnad: arheometallurgia, metallograafia, rauasulatus, raud, šlakk

Sissejuhatus

Raud ja sellest valmistatud esemete uurimine on ilmekaks näiteks, kuidas pealkirjas püstitatud küsimused muutuvad iga järgmise küsimuse juures aina keerukamaks. On ju raua kui magnetilise metalli identifitseerimiseks vaja üksnes magnetit, kuid kui tahame teada, mis esemes lisaks rauale on, ei saa ilma tüki välja saagimise ja mikrolihvita. Õigupoolest leidub täiesti mittedestruktiivseid uurimisviise raua sisse „vaatamiseks", nende seas eriti lootustandvaina neutronhajumisel põhinevad meetodid, kuid metallograafiline analüüs on nendega võrreldes hetkel veel informatiivsem ja märksa odavam. Metallograafiline analüüs algab proovi võtmisega esemest. Seejuures valitakse tavaliselt koht, mis annab enim uut teavet, näiteks terariistade puhul

Saage, Ragnar 2026. Rauauuringute kolm põhilist küsimust: eseme materjal, valmistamistehnoloogia ja päritolu. – Pihtide vahel. Studia Vernacula 18, 30–49.

on see osa lõiketerast. Ühtlasi üritatakse leida ristlõige, mis ei näita meile ainult materjali koostist, vaid ka valmistamistehnoloogiat. Metallograafiline analüüs on ka eelduseks esemete päritolu määramisel.

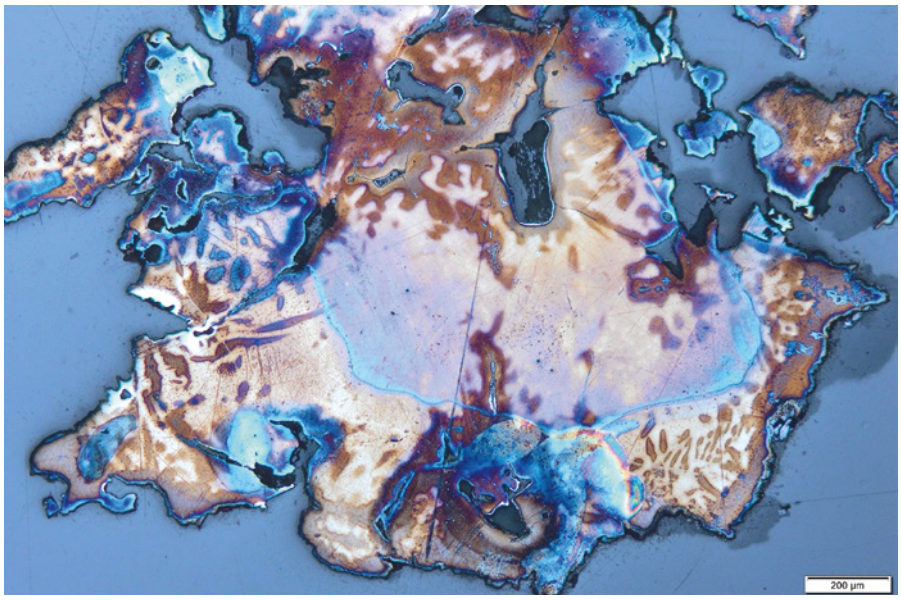
Eelpool nimetatud analüüsid muutuvad aga keerukaks, kui juttu tuleb arheoloogiliste raudesemete uurimisest. Millistel juhtudel on põhjendatud raudeseme katki lõikamine? Vastus oleneb püstitatud uurimisküsimusest ja eseme enda potentsiaalist nendele küsimustele vastata. Järgnevas artiklis annan ülevaate mitmest uurimisküsimusest. Kuidas määratakse raudesemete koostist ja missuguseid raua sulameid Eestis üldse leiduda võib? Mismoodi määratakse valmistehnoloogiat ja milliseid tootmisvõtteid me muistse metallurgia seas näha võime? Ja viimaks, kuidas teada saada, kust pärineb raudeseme materjal ja mis on selles vallas kõige uuemad teadustulemused?

Metallograafia

Raua ja selle sulamite uurimiseks on pikalt olnud peamine meetod metallograafia. Meetodi sünni võib väga täpselt paigutada 1863. aasta juulikuusse, kui Henry Clifton Sorby tegi mikroskoobiga esimesed vaatlused lihvitud metalliproovist (Smith 1960). Metallograafia võimaldab hinnata materjali puhtust ja lisandite määra, homogeensust, pooride hulka, mehhaanilise töötluse suunda, termotöötlust ja mitmeid muid materjali omadusi. Seetõttu oli see relevantne nii kaasaegse kui ka arheoloogilise materjali uurimisel.

20. sajandi teisel poolel võttis rida uurijaid metallograafia oma peamiseks uurimisviisiks ja samuti suurenes sellega tegelevate teadlaste arv. Arheoloogiliste esemete metallograafilisse uurimisse on väga olulise panuse andnud Ameerika Ühendriikides tegutsenud Cyril Stanley Smith, Ühendkuningriigis Ronald Tylecote ja Taanis Vagn Fabritius Buchwald (Smith 1960; Tylecote 2002; Buchwald 2008). Teisel pool raudset eesriiet tegutsesid Nõukogude Liidu uurijad, neist nimekaim oli Boris Koltšin (1953). Temalt said inspiratsiooni mitmed okupeeritud liiduvabariikides tegutsenud teadlased, nagu Aleksis Anteins Lätis, Jonas Stankus Leedus ja Mihhail Gurin Valgevenes (Anteins 1976; Stankus 1988; Gurin 1982). Tšehhis ja Poolas tekkisid samuti väga tugevad koolkonnad, keda esindasid Radomír Pleiner ja Jerzy Piaskowski (Pleiner 2006; Piaskowski 1960). Eesti rauametallurgia süstemaatilisele uurimisele pani aluse Jüri Peets, kes on metallograafiliselt uurinud sadu Eesti leide raua- ja keskajast (Peets 2003).

Tänapäeval on metallograafia meetodina arheoloogiliste esemete uurimiseks endiselt laialdaselt kasutuses ja seda on võimalik ühendada uute analüüsimeetoditega. Suurimad uuendused on seotud automatiseerimisega, näiteks proovide lihvimisel või mikrofotode tegemisel. Kuigi ka nüüdisajal võiks välja tuua üksikuid nimekaid teadlasi, on uurimine pigem institutsioonide



Joonis 1. Kõrge fosforisisaldusega rauatükk Harjumaalt Pala külast. Kõrge fosforisisaldusega piirkonnad on värvunud pruuniks ja siniseks. *Autor Ragnar Saage.*

põhine ja teadust teevad eri alade spetsialistidest koosnevad meeskonnad nagu Prantsusmaal CNRSi all tegutsev arheomeetria uurimisgrupp või Saksamaal Bochumi kaevandusmuuseumi juures töötav uurimislabor.

Metallograafilise analüüsi jaoks on tarvis lihvida eseme pinda või esemest võtta proov. 1960.–1970. aastatel uuriti Eesti ja Läti damaskitud odaotsi nende pealispinda lihvides (Anteins 1976; Selirand 1975). Niisugune meetod kahjustab esemeid vähem, kuid on ristlõike tegemisega võrreldes vähem informatiivne. Samuti on lihvi kvaliteet halvem, kuna terveid esemeid käsitsi lihvides on raske saavutada ideaalselt siledat pinda. Esemest proovi võtmiseks on mitmeid viise. Levinuim on saagimine täppissaega, millel on vesijahutusega lõikeketas. Vesijahutus on oluline, et mitte rikkuda esemete omaaegset termotöötlust. Selleks võib olla karastamine, mille käigus suurendati terase kõvadust või siis noolutamine ja lõõmutamine sisepingete ning rabeduse vähendamiseks. See sobib hästi nugade, mõõkade, rauakangide, kirveste ja teiste esemete uurimiseks. Prantsusmaal on õnnestunud veejoaga lõigates poolitada keskaegseid rauakange. Eestis võttis Jüri Peets Haapsalu suurtükkidelt edukalt proove südamikpuuriga.

Välja lõigatud metallitükk kinnitatakse kas epoksiidvaha või masina abil kokku pressitava termoplastiku toel madala silindri kujulise proovi sisse. Nende mõõtmed on standardiseeritud, levinuim on 25 mm läbimõõduga silinder, mis tähendab, et lihvpinkide puhul on olemas õige läbimõõduga

proovi hoidjad. See suurendab lihvimise kvaliteeti ja võimaldab lihvida mitut proovi korraga. Tartu Ülikooli arheoloogia osakonna näitel näeb proovi lihvimine välja nii, et esmaseks lihvimiseks kasutatakse üldjuhul suurema karedusega teemantketast (tera suuruseks 74 mikronit), millele järgnevad teemantsuspensioonid terasuurustega 30, 9, 3 ja 1 mikronit.

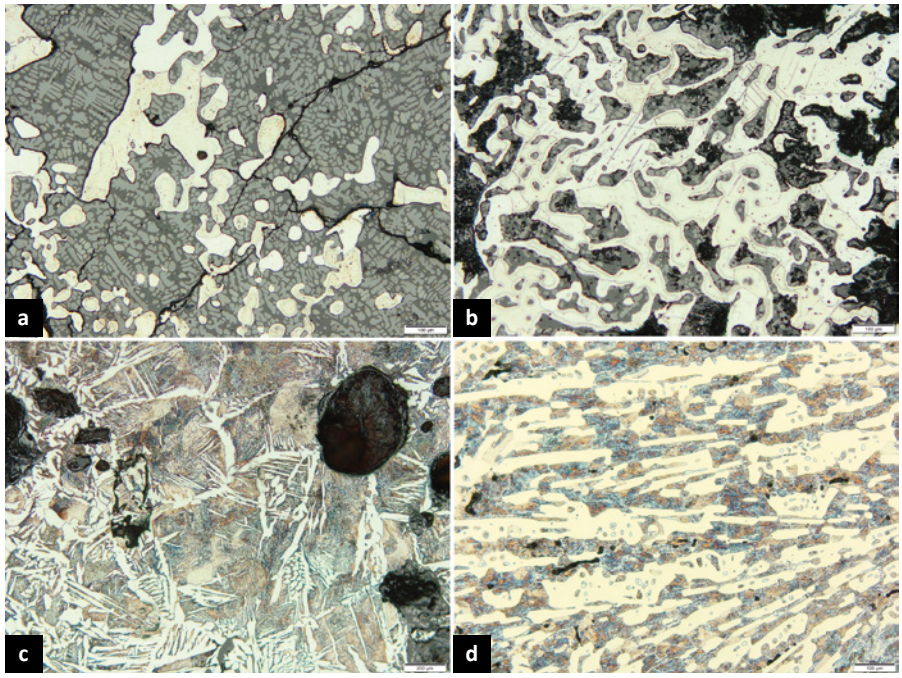
Pärast lihvimist sõltub edasine tegevus uurimisküsimusest. Kui uuritakse süsinikusisaldust, siis peab lihvitavat pinda söövitama. Selleks on levinuim reagent 3% lämmastikhappe lahus piirituses ehk nitaal. Hape teeb siledaks lihvitud pinna taas ebatasaseks, söövitades kõrgema süsinikusisaldusega struktuure ja ferriidi terade piirjooni. Fosforisisalduse ja paljude värviliste metallide uurimiseks on välja töötatud Klemmi reagent (joonis 1). See ei söövita materjali, vaid tekitab uuritava pinna peale värvilise kihi, reageerides proovi pinnal olevate faaside ja pingetega. Vaatlused tehakse esmalt optilise mikroskoobiga, millele võib järgneda uurimine elektronmikroskoobiga. Viimane võimaldab kasutada märksa tõhusamaid suurendusi ja täpselt sihitud elementanalüüsi huvipakkuvatest struktuuridest.

Materjali omaduste testimiseks kasutatakse tihti mikrokõvaduse mõõtmist. Selleks pressitakse valitud jõuga teemantteravik uuritava materjali sisse ja mõõdetakse jäljendi suurust. Pehmetesse materjalidesse jääb suurem jäljend ning vastupidi. Arheoloogiliste esemete uurimisel on levinuim Vickersi kõvadus, mis kasutab jäljendi tegemiseks teemantpüramiidi. Saadud tulemused väljendavad kõvadust Vickersi skaalal, kuid teistesse skaaladesse (nagu Rockwell ja Brinell) saab tulemusi ümber konverteerida.

Materjal

Metallograafilise analüüsi käigus saab esimesena vastuse küsimus: mis materjaliga on tegemist? Veel täpsemalt aga saame teada, mis sulamiga on tegu ja milliseid ebapuhtuseid (nagu šlakk) see sisaldab. Raud on ainuke metall, mida toodeti Eestis muistsel ajal kohalikust toorainest. Selleks kasutati enamasti limoniiti, mis rahvakeeli on tuntud sooraua nime all. Metallograafilised analüüsid töötlemata kaubaraua toorikutest iseloomustavad hästi raua tekkimist sulatusahjus. Arheoloogilised kaubaraua toorikud on ühe eduka rauasulatuse tulemus ehk ahjust välja võetud käsnraud, mis sepistati kohe ahju kõrval neljakandiliseks või ümaraks leivakujuliseks pätsiks. See tähendab, et nad esindavad just seda materjali, mida rauasulatajad ahjus tootsid, kuid mida pole kuigi palju töödeldud. Tihti näeme, kuidas süsinikuvaba raud on pesade või saartena ahjus hangunud šlaki sisse jäänud (joonis 2: a). Samuti näeme, kuidas väiksemad tükid on liitunud järjest suuremaks kamakaks (joonis 2: b).

Soomaagist sulatatud raud ei ole kunagi puhas. See sisaldab erinevaid elemente, millest mõned on soodsate omadustega (näiteks süsinik ja mangaan,



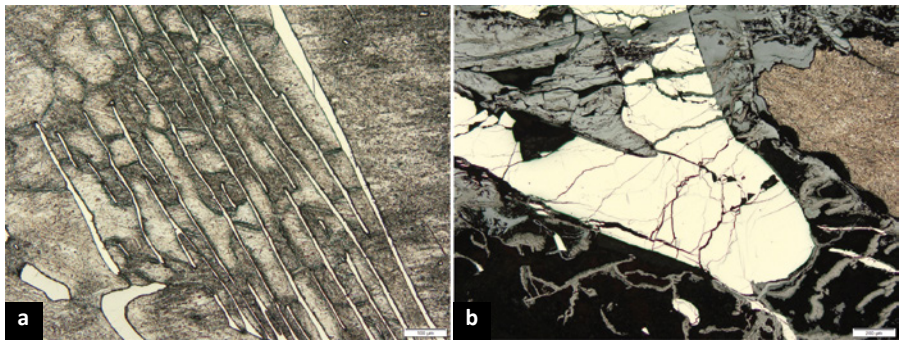
Joonis 2. Raud ja selle erinevad sulamid: a) puhas raud ehk ferriit (hele) ja šlakk (tumehall) Varja kaubaraua toorikus; b) šlakipesadega kaubaraua toorik Maalasti külast; c) kõrgema süsinikusisaldusega ala Maalasti kaubaraua toorikus; d) perliit (tume) ja tsementiit (hele) Prassi külast leitud malmitükis. *Joonise 2a, 2b, 2d autor Ragnar Saage, 2c – Kristo Oks.*

mis suurendavad tugevust ja kõvadust), samas kui väävel ja fosfor põhjustavad haprust. Analüüsid kaubaraua toorikutest näitavad, et enamasti oli tegemist väga madala süsinikusisaldusega rauaga. Kohati võivad selles olla kõrgema süsinikusisaldusega alad, kuid üldjuhul on see piisavalt madal, et kvaliteetsete terariistade valmistamiseks tuleb sihilikult toota terast.

Teras on raua ja süsiniku sulam, kus viimase sisaldus jääb 0,3%–2,1% vahele. Terase mikrostruktuur sõltub selle termotöötlusest. Lõõmutatud või aeglaselt maha jahtunud terase mikrostruktuur on perliitne (joonis 2: c). Perliit koosneb ferriidist ja tsementiidist ehk raudkarbiidist (Fe_3C). Teras annab võimaluse termotöötluseks, kuna üle 800 °C kuumutatud ja vedelikus kiiresti jahutatud teras on martensiitse struktuuriga. See võib olla lõõmutatud terasest neli korda kõvem, kuid samas ka hapram. Martensiidi hapruse tõttu kasutatakse noolutamist, mille käigus kuumutatakse terast mitmesaja kraadini. Niisugune praktika suurendab tugevust ja kahandab materjali kõvadust. Hea näide noolutatud terasest pärineb Rooma rauaaegsest kirvest Kohtla Vanaküla ohverduskohas (Saage jt 2018a), millest on lähemalt juttu järgmises peatükis.

Terase tootmiseks on mitmeid meetodeid. Eestis on kohapeal rauda toodetud otsetaandamise teel, mis tähendab, et sulatusahjust välja võetud raud oli küll heterogeenne, kuid üldiselt üsna madala süsinikusisaldusega. Nõnda oli pärast raua sulatamist tarvis eraldi toota terast. Arheoloogiliste leidude hulgas pole Eestis ühtegi näidet terasetootmisest, kuigi metallograafiliselt uuritud leidude hulgas on kvaliteetne teras väga tavaline (vt Peets 2003). Seega võime järeldada, et arheoloogid pole suutnud terase tegemise jälgi tuvastada või on tegemist ülivähe jälgi jätva protsessiga. 2025. aasta suvel viis allakirjutanu koos Kristo Oksaga Rõuge muinastalus läbi terasetegemise katseid, kus proovisime kahte erinevat meetodit (Oks, Saage 2026). Neist esimene oli 12. sajandil elanud munk Theophiluse kirja pandud viis, mis kirjeldab terase tegemist järgmisel meetodil: rauast kang kaetakse searasvaga, mähitakse nahaga ja kaetakse saviga. Kangil tuleb lasta kuivada ja seejärel kuumutada ääsis, kuni see hakkab hõõguma ning hoida seda seal vähemalt tunni jagu. Antud meetodiga pärineb rauda minev süsinik söestunud rasvast ja nahast. Teine viis on ehitada eraldi pisike ahi, mille põhja – lõõtsa õhuvoolust 5 cm madalamale – tekib redutseeriv tsoon. Niisuguses keskkonnas liitub puusöest pärit süsinik rauaga, samas puudub põlemiseks vajaminev hapnik. Seal tuleb samuti rauda kuumutada üks tund. Hilisem metallograafiline analüüs näitas, et mõlemad viisid olid edukad, kuigi süsinik ei olnud rauas väga ühtlaselt jaotunud (Oks, Saage 2026: 26). Asjaolu, et täiesti algajad terasevalmistajad said sellega esimesel katsel hakkama, näitab, et terase tegemine on lihtsam kui raua taandamine maagist ja pidi kindlasti selge olema ka muistsetel käsitöölistel.

Muistsed Hiina metallurgid avastasid, et kui raua süsinikusisaldus on kõrgem kui terasel, siis seda sulamit on võimalik üles sulatada ja valada. Raua ja süsiniku sulamit, kus süsinikusisaldus jääb 2,1–6,67% vahele, nimetatakse malmiks. Malmi sulamistemperatuur on madalaim (1147 °C) 4,3% süsinikusisalduse juures. Grafiidilibledega malmi nimetatakse hallmalmiks. Kui malmis olev süsinik esineb grafiidi asemel tsementiidina, siis on tegemist valgemalmiga (joonis 2: d). Mõlemad eeltoodud sulamid on erinevalt terasest rabedad. Malm on materjal, mida on võimalik eksikombel rauasulatusahjus toota, kui seal esinevad tingimused pole optimaalsed süsinikuvaba raua tootmiseks. Sel juhul pudenevad rabedad malmi tükid esmasel sepistamisel laiali ja rauasulatus on ebaõnnestunud. Taolisi juhtumeid on teada nii eksperimentidest kui ka arheoloogiliste eeskujude näitel. Malmivalu hakkas mujal Euroopas levima 15. sajandil ja tõenäoliselt jõudis see kõnealusel ajal ka Eestisse. Kohalik rauasulatus lõppes praeguste teadmiste juures 15. sajandil, kui mindi üle Rootsist pärit importraua kasutamisele. Siit järeldub, et kui me leiame tootmispaigast malmi, siis on selle malmi vanus indikaatoriks, kas



Joonis 3. Kaali meteoriitraua mikrostruktuur: a) taeniit (heledad laastud) ja kamasiit (tume ala); b) meteoriidi maale kukkumise järel tekkinud praod rauas. *Joonis Kristo Oks (Oks, Saage 2025 lisa 6).*

tegemist on raua tootmise või malmivalamise kohaga. Seega kui metallograafilise analüüsi käigus tuvastatakse malmi, siis võib sestsamast objektist võtta veel ühe lõike ja saata dateerimiseks radiosüsiniku meetodil. Eestis on tulemuslikult dateeritud sel viisil nooremasse rauaaega Kõpu rauasulatuskoht ja 20. sajandisse Prassi malmivalamise koht (Saage, Oks 2024). Eestist on viimasel aastakümnel metalliotsijaga leitud mitmeid malmist kange, mille täpne vanus ja otstarve on veel ebaselge. Tõenäoliselt on vähemalt osa neist olnud kasutusel alasitena, aga neid võidi tarvitada ka laevade ballastina.

Kõrge fosforisisaldusega rauamaagi kasutamisel toodeti rauda, mis samuti sisaldas fosforit. See lisand teeb sarnaselt süsinikule rauda kõvemaks, kuid nagu malmi puhulgi võib fosfori liigne sisaldus põhjustada rabedust. Fosforisisaldusega raua leidumine arheoloogilistes esemetes on üsna tavaline nähtus. Kui metalli pinda poleeritakse ja söövitatakse keemiliste reagentidega (näiteks nitaali või Oberhofferi lahusega), reageerivad fosforirikkad piirkonnad söövitusele ümbritsevast metallist erinevalt. Selle tulemusena jääb nähtavale nõrk, hele või varjulaadne joontevõrgustik ehk nn kummitusstruktuur (Thiele, Hošek 2015: 116). Samuti tuleb fosforisisaldus esile Klemmi II reagenti kasutades pruunide ja siniste laikudena (joonis 1). Kõrgema fosforisisaldusega rauda on sihilikult kasutatud kaunistusena Kesk-Euroopa damaskitud terades ja mõnedel juhtudel ka mitmekihilistes nugade lõiketerades, kuna selle kõvadus on suurem kui süsinikuvaba raua oma (Thiele, Hošek 2015). Eestis on teada juhtumeid, kus kõrge fosforisisaldusega rauda on kõrvale praagitud, näiteks Käku sepikojas Saaremaal (Saage jt 2018b), samas on sellest sepistatud rauakange välja tulnud näiteks Viljandimaal Tarvastu ordulinnuse sepikojas (Valk jt 2022).

Kui eelnimetatud näited olid kõik maine raud, siis Eestis leidub ka kosmilise päritoluga rauda ehk meteoriitrauda. Seda osati Lähis-Idas juba pronksiajal sepistada kauniteks esemeteks ja seda peeti väga hinnaliseks

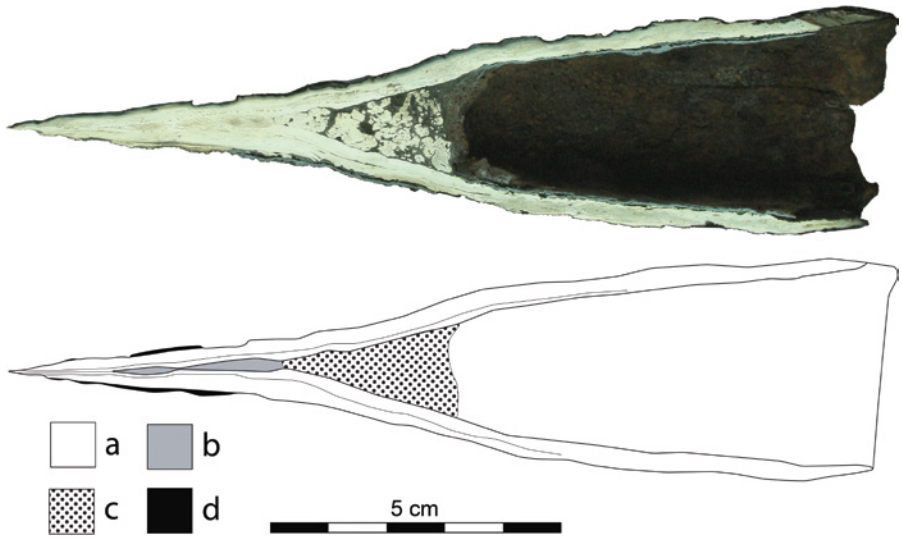
materjaliks. Eestis on oma meteoriitraua „maardla" Kaali kraatriväljal, kuid pole päris selge, kas seda rauda ka sihilikult korjamas käidi. Meteoriitraua tunneb ära kõrge niklisisalduse järgi, mida erinevalt süsinikust on võimalik mõõta mittedestruktiivselt, kasutades röntgenflorestsents-spektromeetrit. Metallograafilise analüüsi abil näeme aga kosmilisel ajaskaalal tekkinud struktuure, mida pole võimalik inimestel järele teha (joonis 3). Seetõttu on meteoriitraud tuvastatav ka pärast sepistamist. Šveitsist leitud pronksiaegne meteoriitrauast nooleots on sarnane Kaali meteoriidi koostisega (Hofmann jt 2023), kuid sobib kokku ka kahe teise meteoriidiga. Seega ei ole täie kindlusega teada ühtegi Kaali meteoriidist valmistatud arheoloogilist eset.

Valmistamistehnoloogia

Metallograafiline analüüs võimaldab tuvastada eseme valmistamistehnoloogiat. Raua ja terase liitmiseks on tarvis sepakeevitust, mis jätab tuvastatava liitekoha kahe materjali piirile. Liitekoht võib esineda heleda joonena kahe materjali piiril, pideva räbustist pärineva šlakipesade ketina, järsu süsinikusisalduse muutuse või siis lapikute šlakipesade orientatsiooni järsu muutusena (Pleiner 1973). Väärtuslikku teavet annab seega mitte ainult raua metalliline osa, vaid ka seal sisalduvad šlakipesad ja poorid. Kui tühimikud on ümarad, siis järelikult pole materjali korralikult tihedaks sepistatud. Sama võib öelda suurte šlakipesade kohta, mida korralikult läbisepistatud ja korduvalt volditud materjalis ei tohiks enam olla.

Võtame vaatluse alla 3.–5. sajandisse dateeritud putkkirve Kohtla Vanaküla ohverduskohast (Saage jt 2018a). See kirves lõigati pikisuunas täppissaega pooleks, mis võimaldas tuvastada kirve ehituse ja selle jaoks kasutatavate materjalide töötlusastme. Kohtla putkkirves oli kokku sepistatud neljast komponendist. Kirve põhiosa koosnes toruks keeratud ja ühest otsast lapikuks sepistatud raudplekist (joonis 4: a). Selle lapiku otsa sisse lisati üks tükk rauda juurde, et anda terale kolmnurkne profiil (joonis 4: b). Kirve sisse varrepoolsesse otsa pandi suure šlakisisaldusega toorrauda, mis on omapärane materjali valik (joonis 4: c). Ühest küljest võib öelda, et šlakirohke raud on töötlemata ja täis ebapuhtuseid, kuid Karmo Kiilmanni läbi viidud sepistamise katsed näitasid, et kirve südamiku täitmiseks ongi tarvis väga plastilist materjali. Seega võime öelda, et Kohtla kirve sepistanud sepp kasutas täpselt õiget materjali, seejuures sai ta ära kasutada šlakisegust toorrauda, millel muud otsatarvet tõenäoliselt polegi. Asjaolu, et sepal leidus toorrauda, viitab ka sellele, et ta oli ise selle raua sulatanud või tegeles käsnraua kangideks sepistamisega.

Kirve terale lisati leht terast (joonis 4: d). Kõik need liitekohad joonistusid mikrostruktuuris hästi välja, kuigi avaldusid erinevalt. Toruks keeratud

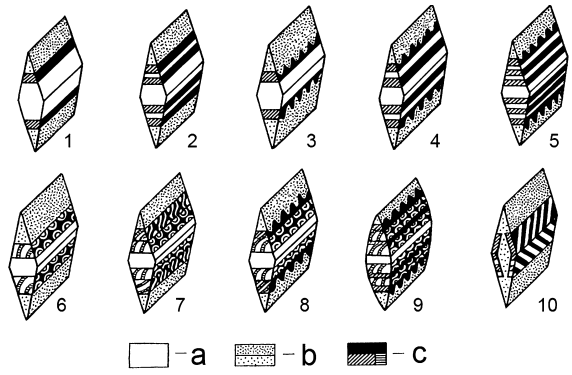


Joonis 4. Kohtla putkkirve söövitatud ristlõige (ülal) ja kirve ehitus (all): a) rauast kirve põhiosa; b) teraosa sisse lisatud komponent; c) šlakisegune raud kirve südamikus; d) terasleht lõiketeral. *Joonis Saage jt 2018a järgi.*

raudplekk ise oli mitu korda kokku volditud. Terase ja kirve põhiosa liitekoht oli näha pideva šlakipesade joonena, samas kui terasest osa sees kulges samamoodi keevisjoon. Viimane on arvatavasti teraslehe enda kokkuvoltimise jälg, mis võis toimuda materjali ettevalmistamise faasis enne ülejäänud kirvega kokkusepistamist. Pärast kirve valmissepistamist on see kuumutatud üle 800 °C ja vedelikus maha jahutatud. Tegevuse tulemusel tekkis kõva, kuid rabe martensiit. Kuna kirves tööriistana ei tohi olla rabe, siis on seda veel täiendavalt noolutatud temparatuuril, mis ületas 200 °C (Saage jt 2018a: 57).

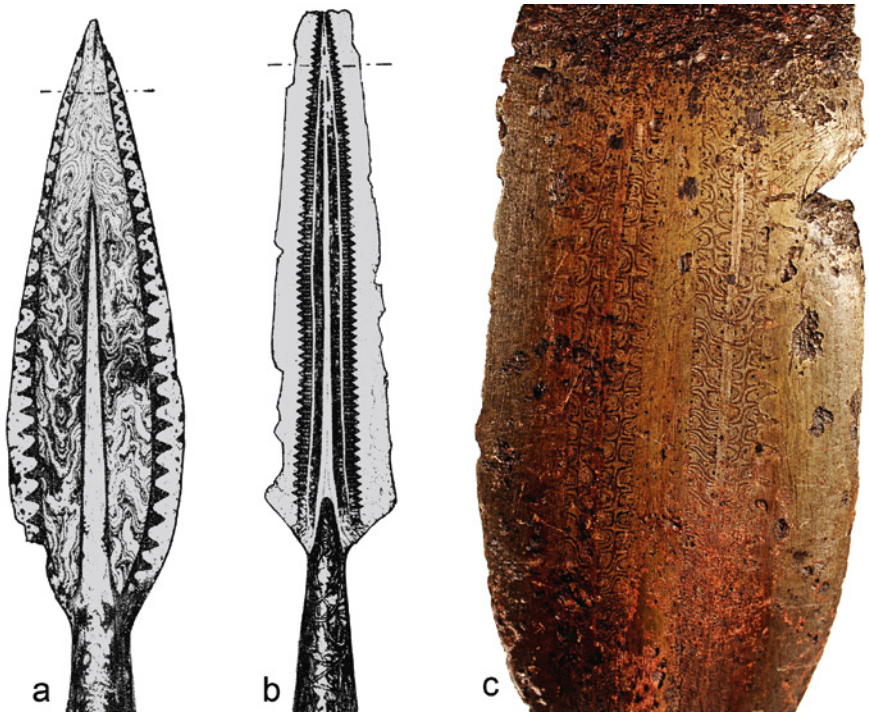
Võib öelda, et üks kohaliku sepakunsti kõrgaaegu langeb 10.–12. sajandisse, kui Eestis ja naabermaades levisid damaskitud teraga odaotsad. Me teame seda tänu Läti uurijale Aleksis Anteinsile ja Eesti teadlastele Andres Läänele ja Jüri Selirannale, kes 1960.–1970. aastatel uurisid Läti ja Eesti damaskitud odaotsi. Nende peamine meetod oli eseme pinna lihvimine, poleerimine ja happega söövitamine[1] sellest proovitükki võtmata. Sel viisil uuriti läbi sadu odaotsi. Eestis tuvastati üle 600 odaotsa hulgast 226 damaskitud odaotsa (Selirand 1975: 172). Lätis tuvastati sel viisil 267 damaskitud odaotsa (Anteins 1976: 57). Osa odaotste ehitust uuriti ka ristlõike abil. Damaskimine on tehnika, mille käigus sepistatakse omavahel kangideks kokku erineva

1 Heini reagent, mis on 12% CuCl2 × H4Cl lahus.



Joonis 5. Eestist leitud damaskitud odaotste mustrite (1–10) skeemid: a) süsinikuvaba raud; b) teras; c) damaskitud teras.
Selirand 1975, joonis 1.

süsinikusisaldusega plaate, tordeeritakse neid kindlal viisil, et tekitada korrapäraseid mustreid ja seejärel sepistatakse mustriga kangiga kokku, et saavutada odaotsa vorm. Lihtsamad terad olid kokku sepistatud kolmest kangist, samas kui kõige keerulisemad mustrid koosnesid kuuest kangist (joonis 5). Ka kangide endi keerukus oli varieeruv. Kõige uhkema näite toob Anteins Lätist liivlaste asualalt Mārtiņsala saarelt, kust avastati odaots, mille ühe kangi sepistamiseks kasutati 11 plaati (Anteins 1976: 62). Seega koosnes odaots kokku (alates lõikeservast lugedes): ühest lõikeserva moodustavast terasekangist, raua- ja terasekangist, millega loodi hunthammasornament, kahest kangist, milles mõlemas oli 11 plaadist koosnev muster, ning odaotsa südamikuks oli rauast kang (joonis 6:



Joonis 6. Damaskitud odaotsad Lätist ja Eestist: a) Mārtiņsala; b) Salaspils; c) Viltina.
Joonis a ja b – Anteins 1976, joonis 77; c – Ragnar Saage.

a). Taoliste mustrite esinemine tähendab, et muistsed meistrid tundsid väga hästi ühtlase süsinikusisaldusega terase valmistamise kunsti ja söövitamist.

Kõige keerulisema mustriga odaotste näited pärinevad Salaspilsist ja Viltinast Saaremaalt (joonis 5: 9; joonis 6: b ja c). Huvitav on seejuures asjaolu, et Viltina ja Salaspilsi näited on eri tüüpi odaotstel, kuid sisaldavad täpselt samadest kihtidest koosnevat keerulist damaskimist. Sellest võib järeldada, et ilmselt kandsid damaskimisega saavutatud mustrid tähendusi, mis on praeguseks kadunud. Samuti on huvitav, kus võiks asuda taoliste odaotste valmistamise keskus. Kui Läti mõlemad üheksanda grupi leiud on avastatud liivlaste asualalt, siis Eesti kahest vastest pärineb üks Saaremaalt. Väga tõenäoliselt sepistati damaskitud odaotsi mitmes keskuses Läänemere ümber, nagu väidab oma mahukas monograafias Kristina Creutz (2003). Nendest üks või mitu asusid Saaremaal, Väina jõel liivlaste asualal, samuti balti hõimude käsitöökeskustes ja Mandri-Eestis. Eelöeldu teadasaamine on aga võimalik – kui päritoluanalüüs näitaks, et need odaotsad on tehtud kohalikust rauast ja terasest, siis võiks üsna suure kindlusega rääkida kohapealsest toodangust. Hea uudis on, et esimesed sammud taolise analüüsi jaoks on juba tehtud.

Päritolu

Päritoluanalüüs on võrreldes materjali ja tehnoloogia väljaselgitamisega keerukam, kuna nõuab lisaks uuritava objekti analüüsile võrdlusmaterjali maagi maardlatest või tootmispaikadest. Võrreldes rauaga on vase, plii ja hõbeda päritolu väljaselgitamine väga levinud ning arenenud eraldi aladistsipliiniks arheometallurgilises uurimistöös. Mõneti üllataval kombel on mainitud teadusharu alguse saanud Tartu Ülikoolist 19. sajandi esimeses pooles, kui keemia ja farmaatsia professor Friedemann Göbel püstitas hüpoteesi, et keemilise koostise järgi on võimalik tuvastada esemete päritolu ja publitseeris analüüsid muistsetest vasesulamist esemetest (Göbel 1842). Göbel pakkus välja, et kui kindla päritolu ja iseloomuliku koostisega esemed saab omistada seal elanud kultuuridele, siis võime teadmata eseme päritolu selgitada puhtalt koostise põhjal (Göbel 1842: 8). Tema seadis tähtsale kohale just tsingi sisalduse, väites, et seda sisaldavad vasesulamid on Rooma päritolu ning selle puudus võib viidata Kreekast või mujalt pärit vasesulamitele (Göbel 1842: 16–19). 1860. aastatel mõistsid uurijad, et suur potentsiaal on just jälgelementide (nagu nikkel, arseen ja antimon) uurimisel, kuna sel viisil on võimalik eristada kasutatud maakide tüüpe ja nende leiupiirkondi (Pernicka 2014: 239). Samas olid tolle aja uurijad piiratud analüütilise võimekusega, mistõttu läks ligi 70 aastat enne, kui tehti järgmisi suuri edusamme.

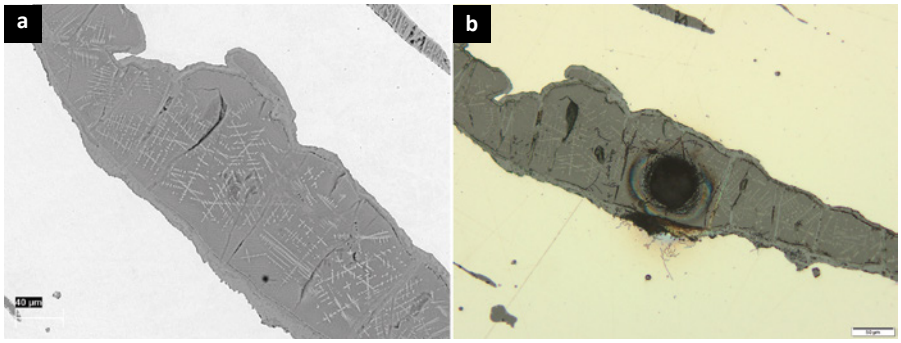
Aatomemissioonspektromeetria kasutuselevõtt 1930. aastatel oli suur murrang, kuna see võimaldas koguda täpsemat andmestikku ja hüppeliselt

kasvas proovide hulk (Pernicka 2014, 240). Samas tekitasid kasvanud andmehulgad järgmise probleemi – nende läbitöötamiseks ja seoste nägemiseks läks vaja arvutite abi. Samal ajal toimus aga teine areng, kui hakati uurima metallide päritolu läbi plii isotoopide. See lubas senisest palju kindlamaid tulemusi, kuna plii isotoopide omavahelised vahekorrad annavad infot metallimaardla geoloogilise vanuse kohta, mis omakorda laseb kitsendada võimalike päritolupiirkondade ringi. Tänapäeval on mõlemad meetodid – jälgelementide ja plii isotoopide analüüsid – kasutusel samaaegselt koos statistiliste analüüsidega, mis võimaldavad saada väga usaldusväärseid tulemusi. Võrdlusbaasi kättesaadavuse parandamiseks on loodud andmebaas TerraLID (varasemalt GlobaLID), mis koondab endas analüüsitud esemete ja maakide andmestikku (Westner jt 2023).

Raua päritolu analüüs on osutunud mitmes mõttes keerukamaks kui vasesulamite päritolu kindlaks tegemine. Probleem seisneb selles, et rauamaagid on märksa nooremad – eriti laialt kasutusel olnud soomaagid on tekkinud geoloogia mõistes üsna hiljuti, mistõttu ei saa neid eristada geoloogilise vanuse abil. Paljud varasemad katsed edukalt raua päritolu määrata on jäänud kahe probleemi taha: mõõtmistäpsus ja andmete statistilise analüüsimise võimekus. Edukaid näiteid on tuua juhtumitest, kus võime rääkida väga selgetest sisalduse erinevustest, näiteks suudeti kõrge mangaani ja madala fosforisisalduse abil tuvastada, et Taanist leitud kirved on tehtud Norras toodetud rauast (Buchwald 2008: 451).

Viimase paarikümne aasta jooksul on mitmed takistused edukalt ületatud ja võime rääkida suurest murrangust raua päritolu uuringutes. Käesoleval ajal on levinuim meetod päritolu uurimine šlaki koostise abil. Sel juhul mõõdetakse litofiilseid elemente, mis rauasulatuse ajal liiguvad šlaki hulka. Need elemendid pärinevad peamiselt rauamaagist, aga ka puusöest, savist ja sulatuse käigus ahju lisatud räbustist. Raua edasise töötluse käigus raua kihtide vahele kinni jäänud šlakipesade koostis ei muutu, küll aga võib sepakeevise kihtide vahele sattuda räbusti osakesi, mis päritolu analüüsiks ei sobi. Seega on enne šlakipesade mõõtmist tarvis teha metallograafiline analüüs ja välja selgitada esemete sepistamise skeem, et välistada sepistamise käigus lisandunud šlakipesad. Seetõttu eeldab koostise määramine esemest ristlõike tegemist.

Edukas päritolu analüüs eeldab nii rauasulatuse šlaki ja esemetes leiduva šlaki kokku viimist, mis on problemaatiline, kuna kindlasti on palju rauasulatuskohti veel avastamata. Eesti näitel võime öelda, et rauasulatusšlaki koostise sisaldus on tugevas seoses geoloogilise pealiskorra ja seda katvate setetega (Jegorov jt 2026). See tähendab, et kui me teame mõnda rauasulatuskohta näiteks Põhja-Saaremaal, siis on tõenäoline, et seal leiduva šlaki sisaldus on väga sarnane teiste veel leidmata rauasulatuskohtadega ümbruskonnas. Seega



Joonis 7. Šlakipesa Soomest Lieto linnamäelt leitud noa ristlõikelt: a) pilt skaneeriva elektronmikroskoobiga; b) mikrofoto optilise mikroskoobiga peale laserablatsiooni. *Joonis Ragnar Saage.*

tasuks antud meetodist mõelda mitte kui eseme tagasiviimisest ühe kindla rauasulatuskohani, vaid rauasulatuspiirkonnani. Kui suur on sarnase signaaliga rauasulatuspiirkond ja kui palju neid Eestis on, pole veel täpselt selge.

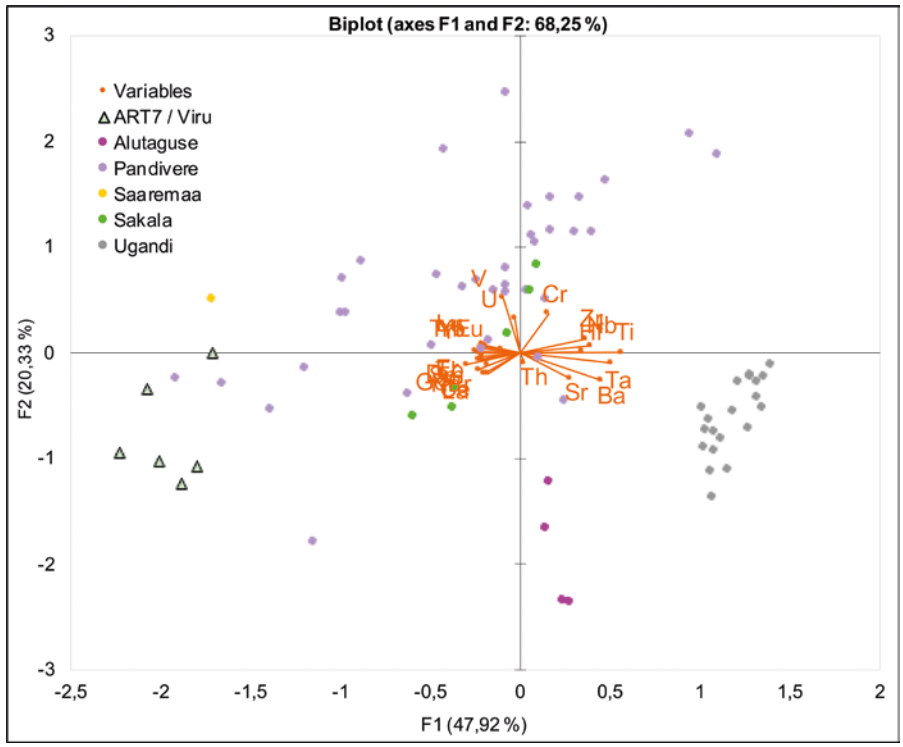
Šlaki põhjal tehtava raua päritolu analüüsi metoodika on järgmine. Analüüs algab ülalpool kirjeldatud metallograafilise analüüsiga olenemata sellest, kas tegemist on rauasulatuskoha šlaki või eseme seest otsitavate šlakipesadega. Šlaki koostise analüüs tehakse esmalt skaneeriva elektronmikroskoobi energiadispersiivse röntgenkiirgusspektroskoopia (SEM-EDS) abil (joonis 7 a). See annab kõrge suurendusega pildi šlaki mikrostruktuurist ja šlaki makroelementide koostise. Järgmisena analüüsitakse neid samu kohti laserablatsiooni induktiivsidestatud plasma massispektromeetriga (LA-ICP-MS). Selle meetodiga saadud väga täpsed jälgelementide vastastikused suhtarvud on võtmetähtsusega šlakkide omavahelisel võrdlusel. Andmestiku abil tuleb statistilisi meetodeid kasutades sarnasusi otsima hakata.

Aastatel 2021–2025 tehti esimesed edusammud raua päritolu uuringutes Eestis, kui omavahel võrreldi 9 Eesti rauasulatuskoha ja 11 kaubarauakangi šlakikoostise sisaldusi (Jegorov jt 2026). Selle töö tulemusena suudeti omavahel kokku viia üks Ida-Virumaalt Aa külast leitud kaubaraua kang šlakiga Saunakünka rauasulatuskohalt Lääne-Virumaal. Tegemist on esimese esemega, mille päritolu on suudetud määrata ja seetõttu on kohane kirjeldada täpsemalt, kuidas seda tehti. Aa külast leitud kang oli risttahukakujuline kaubarauatoorik kaaluga 1485 g (joonis 8). See leiti peitvarana koos nelja teise sarnase kangiga otsinguvahendi abil 2015. aastal (Kiudsoo 2017) vaid 400 m põhja pool Alulinna linnusest. Metallograafilise analüüsi abil tuvastati valdavalt süsinikuvaene mikrostruktuur, kuid üle kahe korra kõrgemad kõvaduse mõõtmised viitasid märgatavale fosforisisaldusele rauas (Jegorov jt 2026: lisa 1). Seejärel toimus proovis sisalduvate šlakipesade mõõdistamine SEM-EDSi ja LA-ICP-MS abil.



Joonis 8. Kaubaraua kang Aa külast. *Joonis Ragnar Saage.*

Saadud tulemusi võrreldi mitme erineva statistilise meetodiga uuringu käigus mõõdetud rauasulatuskohtadega ning selgus tugev sarnasus Saunakünka rauasulatuskoha ja Aa kaubatooriku vahel. Eraldi kasutati veel fosforisisalduse abil filtreerimist: kõrge fosforisisaldus Aa kangis (nii rauas



Joonis 9. Peakomponendi analüüs. Aa küla kaubatooriku (ART7) ja rauasulatuskohtade võrdlus. *Joonis G. Żabiński (Jegorov jt 2026: lisa 11).*

kui ka šlakipesades) välistas Saaremaa Tuiu rauasulatuskoha, mis peakomponendi analüüsi (PCA) abil oli samuti sarnane Aa kangile (joonis 9).

Lisaks PCA-analüüsile kasutati klasteranalüüsi, mis paigutab mõõdistused sarnasuse järgi üksteisele lähedal asuvatesse klastritesse. Ka selle järgi oli Saunakünka rauasulatuskoht kõige lähedasem Aa kangi šlakikoostisele (Jegorov jt 2026).

Aastatel 2024–2025 viidi läbi projekt „Raua päritolu määramise alusuuring Eestis", mille käigus kaardistati ja analüüsiti veel 19 rauasulatuskoha šlaki koostist – pärast seda võib juba rääkida heast valimist, mis katab Eesti tähtsamaid rauasulatuspiirkondi. Lähiaastatel on oodata ses vallas mitmeid juhtumiuuringuid.

Arutelu

Destruktiivne uurimismeetod on põhjendatud juhtudel, kui mittedestruktiivsed meetodid ei anna piisavalt infot uurimisküsimusele vastamiseks ja püstitatud uurimisküsimus on hästi põhjendatud. Samuti on oluline valida õige koht proovide võtmiseks. Kohtla putkkirves on hea näide destruktiivsest uuringust, mille tulemusena saadi üliväärtuslikku teavet Rooma rauaaja rauametallurgia kohta. Kui putkkirvest oleks proovid võetud teisiti (näiteks oleks uuritud ainult lõiketera), oleks täiesti märkamatuks jäänud šlakirohke komponent selle südamikus. Kui Läti uurija Anteins uuris Mazkatuži putkkirvest, siis tema tegi kirvest kaks väiksemat lõiget (Anteins 1976). Väga tõenäoliselt on Kohtla ja Mazkatuži kirved samasuguse ehitusega, kuid alles pärast Kohtla kirve uurimist täieliku ristlõike abil saime me teada, miks see šlakisegune komponent kirve südamikus on.

Eespool mainitud odaotste uuringus lihviti ligi mitmesaja odaotsa pinda, et leida damaskitud terasid. Võib arvata, et tänapäeval ei nõustuks arheoloogiliste kogude hoidjad taolises mahus destruktiivsete uuringutega, kuid samas tuleb hinnata sellest uuringust saadud teavet. Ilma kõnealuse mahuka analüüsita poleks teadlastel aimugi, et tegemist oli nii levinud fenomeniga. Eesti damaskitud odaotsad, nende mikrostruktuur ja päritolu vajaksid kahtlemata moodsate meetoditega jätku-uuringuid.

Päritoluanalüüsidel on suur potentsiaal ja nende abil võime küsida hoopis uut laadi küsimusi. Aa kangi päritolu kokkuviimine Saunakünka rauasulatuskohaga võimaldab vaadata tollast kultuurmaastikku värske pilguga. Seos viitab Virumaa-sisesele kaubandusele – rannikuäärsesse külla toodi ligi 40 km kauguselt sisemaalt korralik kogus rauda. Kuna Aa kaubaraua peitvara pole madala süsinikusisalduse tõttu otseselt võimalik dateerida, siis võime kasutada Saunakünka rauasulatuskoha dateeringut, mis langeb 7.–9. sajandisse pKr (Peets 2003). See sobib väga hästi kokku

värskete kaevamistulemuste ja radiosüsinikudateeringutega Alulinna linnuselt, kus selgus, et müüri rajamise aja võib paigutada vahemikku 660–774 aastat pKr, samas kui linnuse hoovis on elutegevusega seotud kiht ajast 660–820 aastat pKr (Siig jt [ilmumas]). Alulinna ja Saunakünka dateeringute kattumine lisab kindlust, et Aa kangide seostamine Saunakünka rauasulatuskohaga on tõene ja peitvara võiks pärineda samast perioodist kui kõrvalasuv linnus.

Kokkuvõte

Käesolev artikkel käsitleb rauauuringute kolme põhilist küsimuste ringi – eseme materjali, valmistamistehnoloogiat ja päritolu – ning näitab, et nendele vastamine eeldab järjest keerukamate analüüsimeetodite rakendamist. Kui raua tuvastamine on lihtne, siis selle koostise, omaduste ja töötlusviiside mõistmine nõuab enamasti metallograafilist analüüsi, mis omakorda tähendab sageli eseme osalist kahjustamist. Metallograafia võimaldab aga üheaegselt uurida nii materjali kui ka tehnoloogiat ning loob eelduse päritolu määramiseks, mistõttu on see jätkuvalt keskne meetod arheoloogiliste raudesemete uurimisel.

Artiklis annan ülevaate raua ja selle sulamite omadustest. Eestis muinasajal toodetud raud oli enamasti madala süsinikusisaldusega ning kvaliteetse terase saamiseks tuli seda täiendavalt töödelda. Samuti vaatlen erinevaid sulameid nagu malm, fosforirikas raud ja meteoriitraud ning nende tuvastamise võimalusi. Valmistamistehnoloogia osas näitlikustan, et metallograafiline analüüs võimaldab mõista esemete ehitust ja töövõtteid, tuues esile praktilisi lahendusi Kohtla putkkirve näol kui ka kõrgetasemelist käsitööoskust damaskitud odaotste puhul.

Päritoluanalüüsi käsitlev osa tõi esile selle valdkonna kiire arengu viimastel aastakümnetel. Eriti oluline on šlaki koostisel põhinev lähenemine, mis võimaldab siduda esemeid konkreetsete rauasulatuspiirkondadega. Eesti näitel demonstreerin, et sellised uuringud võivad anda uusi teadmisi kaubandusvõrgustike kohta ning aidata täpsustada rauasulatuse kronoloogiat.

Kokkuvõttes võib öelda, et rauauuringud on tugevalt interdistsiplinaarne valdkond, kus materjali, tehnoloogia ja päritolu käsitlemine moodustavad lahutamatu terviku. Destruktiivsete meetodite kasutamine on põhjendatud juhtudel, kui uurimisküsimus seda nõuab ja saadav teadmine kaalub üles eseme kahjustamise. Hoolikalt valitud proovide võtmine ning kaasaegsete analüüsimeetodite rakendamine võimaldavad aga saada hindamatu väärtusega informatsiooni meie mineviku kohta.

Rahastus

Artikli valmimist toetasid projekt „Raua päritolu määramise alusuuring Eestis“ (EKKD-TA9), mida rahastas Haridus- ja Teadusministeerium ning projekt „Brothers in Arms: provenancing metal war gear from the first Viking Raid to the East“ (MetRa), mida rahastab Euroopa Komisjon läbi Marie Skłodowska-Curie rahastusmeetme.

Allikad

Anteins, Aleksis 1976. *Melnais metāls Latvijā*. Riia: Zinatne.

Buchwald, Vagn Fabritius 2008. Iron, Steel and Cast Iron Before Bessemer: The Slag-analytical Method and the Role of Carbon and Phosphorus. – *Historisk-filosofiske Skrifter* 32. The Royal Danish Academy of Science and Letters.

Creutz, Kristina 2003. *Tension and tradition: a study of late Iron Age spearheads around the Baltic Sea*. Stockholm: Stockholm Universitet.

Gurin, Mihhail 1982. *Drevnee zhelezo Belorusskogo Podneprovja (I tysjatšeletie n. e.)*. Akademija nauk Belorusskoi SSR, Institut istorii. Minsk: Nauka i tehnika.

Göbel, Carl Christian Traugott Friedemann 1842. *Ueber den Einfluss der Chemie auf die Ermittelung der Völker der Vorzeit, oder, Resultate der chemischen Untersuchung metallischer Alterthümer, insbesondere der in den Ostseegouvernements vorkommenden, Behufs der Ermittelung der Völker, von welchen sie abstammen*. Enke: Erlangen.

Hofmann, Beda A., **Schreyer**, Sabine Bolliger, **Biswas**, Sayani, **Gerchow**, Lars, **Wiebe**, Daniel, **Schumann**, Marc, **Lindemann**, Sebastian, **García**, Diego Ramírez, **Lanari**, Pierre, **Gfeller**, Frank, **Vigo**, Carlos, **Das**, Debarchan, **Hotz**, Fabian, **von Schoeler**, Katharina, **Ninomiya**, Kazuhiko, **Niikura**, Megumi, **Ritjoho**, Narongrit, **Amato**, Alex 2023. An arrowhead made of meteoritic iron from the late Bronze Age settlement of Mörigen, Switzerland and its possible source. – *Journal of Archaeological Science* 157. https://doi.org/10.1016/j.jas.2023.105827.

Jegorov, Sander, **Żabiński**, Grzegorz, **Andreasen**, Rasmus, Birch, Thomas, **Somelar**, Peeter, **Oks**, Kristo, **Peets**, Jüri, **Saage**, Ragnar 2026. Local or interregional exchange systems? A study of Estonian iron provenancing. – *Journal of Archaeological Science* 186. https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106454.

Kiudsoo, Mauri 2017. Kaubatoorikute peitvara Ida-Virumaalt Aa külast. Eksperdihinnang. Käsikiri Eesti Muinsuskaitseameti arhiivis.

Koltšin, Boriss 1953. Tšornaja metallurgija i metalloobrabotka v drevnei Rusi (domongolski period). Moskva: Izdatelstvo Akademii nauk SSSR.

Oks, Kristo, **Saage**, Ragnar 2025. Eksperdihinnang Kaali kraatrivälja meteoriitrauast. Käsikiri Eesti Muinsuskaitseameti arhiivis.

Oks, Kristo, **Saage**, Ragnar 2026. Rauast teraseks: uut rauametallurgia uurimise vallast. – *Tutulus: Eesti arheoloogia aastakiri* 2025, 25–26.

Peets, Jüri 2003. *The power of iron: iron productiuon and blacksmithy in Estonia and neighbouring areas in prehistoric period and the middle ages*. Tallinn: Ajaloo Instituut.

Pernicka, Ernst 2014. Provenance determination of archaeological metal objects. – *Archaeometallurgy in global perspective: Methods and syntheses*. Toim. B.W. Roberts ja C.P. Thornton. New York: Springer, 239–268.

Piaskowski, Jerzy 1960. *Technika gdańskiego hutnictwa i kowalstwa żeleznego X–XIV w. na podstawie badań metaloznawczych. Gdańsk wczesnośredniowiecny tom II*. Gdańsk: Gdańskie Towarzystwo naukowe.

Pleiner, Radomír 1973. Metallography of Early Artifacts: the Problem of Welding Together Iron and Steel. – *Early Medieval studies*. Antikvariskt arkiv 53.

Pleiner, Radomír 2006. Iron in archaeology: early European blacksmiths. Praha: Archeologický ústav AV ČR.

Saage, Ragnar, **Kiilmann**, Karmo, **Tvauri**, Andres 2018 a. Manufacture technology of socketed iron axes. – *Estonian Journal of Archaeology* 22(1), 51–65.

Saage, Ragnar, **Peets**, Jüri, **Kulu**, Priit, **Peetsalu**, Priidu, **Viljus**, Mart 2018b. Metallographic investigation of iron blooms and bars from the smithy site of Käku, Estonia. – *Fennoscandia archaeologica* XXXIV(2017), 46–58.

Saage, Ragnar, **Oks**, Kristo 2024. Iron smelting or smithery: surveying the uncertain iron working sites in Estonia. – *Arheoloogilised Välitööd Eestis* 2023, 189–96.

Selirand, Jüri 1975. Estnische Gruppe der nordeuropäischen Lanzenspitzen mit damasziertem Blatt. – *Eesti NSV Teaduste Akadeemia toimetised. Ühiskonnateadused* 24(2), 171–186.

Siig, Kristo, **Saage**, Ragnar, **Nuut**, Sander, **Tvauri**, Andres [ilmumas]. Alulinn hill fort in North-East Estonia: archaeological excavations of the rampart and validating the results of geophysical studies. – *Arheoloogilised Välitööd Eestis* 2025.

Smith, Cyril Stanley 1960. A History of Metallography. The development of ideas on the structure of metals before 1890. Chicago: University of Chicago Press.

Stankus, Jonas 1988. Geležies dirbinių metalografinė analizė. – *Lietuvos Archeologija* 6, 65–76.

Thiele, Ádám, **Hošek**, Jiří 2015. Estimation of phosphorus content in archaeological iron objects by means of optical metallography and hardness measurements. – *Acta Polytechnica Hungarica* 12(4), 113–126.

Tylecote, Ronald Frank 2002. A history of metallurgy (2nd Edition). London: Maney.

Valk, Heiki, **Saage**, Ragnar, **Oks**, Kristo, **Sammler**, Sandra 2022. Archaeological excavations in Tarvastu, castle of the Teutonic Order: Arheoloogilised kaevamised Tarvastu ordulinnuses. – *Arheoloogilised Välitööd Eestis* 2021, 113–128.

Westner, Katrin J., **Rose**, Thomas, **Klein**, Sabine, **Hsu**, Yiu-Kang, **Becerra**, María Florencia, **Nezafati**, Nima, **Renson**, Virginie, **Stephens**, Jay 2023. GlobaLID – Global Lead Isotope Database (Version 08/2025). GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/fidgeo.2025.080

Ragnar Saage (s 1987) on arheometallurg ehk mineviku metallitööd uuriv arheoloog. Ta kaitses doktorikraadi Tartu Ülikoolis arheoloogia erialal. Peamiste uurimisteemade hulka kuuluvad rauasulatuse, sepistamise ja metallivalamise paigad ning erinevad metallitöö tehnikad. Ta kasutab oma uurimistöös loodusteaduslikke uurimismeetodeid nagu metallograafia ja erinevad elementanalüüsi tehnikad (XRF, SEM-EDS, ICP-MS). Selle kõrval on olulisel kohal eksperimentaalarheoloogilised katsed Rõuge muinastalus ja mujal. Neist kõige edukamad on olnud rauasulatuskatsed keskaegse Tuiu tüüpi ahjuga. Artikli ilmumise ajal, 2026. aastal, täiendab ta end järeldoktorantuuris Aarhusi ülikooli geoteaduste osakonnas, uurides Salme laevmatuste sõjavarustuse päritolu.



Foto Erakogu

Three Fundamental Questions in Iron Research: Material, Manufacturing Technology, and the Provenance of Iron Artefacts

Abstract

This article discusses the three principal research questions in archaeometallurgical studies of iron: the identification of material composition, the reconstruction of manufacturing technology, and the determination of provenance. While the identification of iron as a material is relatively straightforward, answering increasingly complex questions about its composition, production, and origin requires progressively more sophisticated analytical approaches. Among these, metallography remains the most important and versatile method for the study of archaeological iron objects, even though it often requires destructive sampling. Metallographic analysis provides information on alloy composition, impurities, carbon content, heat treatment, forging techniques, and the internal structure of artefacts, while also forming the basis for provenance studies.

The article reviews the development and application of metallography in archaeometallurgical research, from its origins in the 19th century to its integration into modern analytical techniques such as scanning electron microscopy (SEM-EDS), laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS), and microhardness testing. Attention is paid to methodological considerations in sampling and preparation, emphasising the importance of selecting appropriate locations for destructive analysis to maximise the information obtained while minimising damage to archaeological artefacts.

Archaeometallurgical analysis demonstrates that prehistoric and medieval iron produced in Estonia from local bog ores was typically low in carbon. The production of steel is discussed, together with its metallographic identification. Experimental reconstructions of steel-making techniques demonstrate that carburisation could be achieved through relatively simple processes, suggesting that ancient craftspeople possessed the necessary knowledge to manufacture steel even though direct archaeological evidence for steel production remains elusive. The article addresses the identification of cast iron, phosphorus-rich iron and meteoritic iron. The latter can be distinguished through its characteristic nickel-rich composition and unique microstructures.

Metallographic analysis also provides detailed insights into manufacturing technology. Case studies, including a Roman Iron Age socketed axe from Kohtla-Vanaküla and pattern-welded spearheads from Estonia and Latvia, demonstrate how metallography can reveal complex forging sequences, welding techniques, material selection, and heat treatment practices. These examples illustrate the high level of technological skill achieved by ancient smiths and highlight the importance of analysing not only the metallic matrix but also slag inclusions and welding interfaces preserved within artefacts.

The final section focuses on provenance studies, one of the fastest developing areas of archaeometallurgical research. Unlike copper alloys, whose provenance can often be determined through lead isotope analysis, iron presents challenges because commonly used bog ores are geologically young and lack distinctive isotopic signatures (at least that we know of). Recent methodological advances have overcome many of these obstacles by focusing on the chemical composition of slag inclusions trapped within iron during smelting. Because lithophile elements are transferred from ore to slag during production and remain largely unchanged throughout subsequent forging processes, the composition of slag inclusions can serve as a geochemical fingerprint of the original smelting environment.

Using a combination of metallographic analysis, SEM-EDS, LA-ICP-MS, and multivariate statistical methods, recent research in Estonia has linked iron artefacts to specific iron-smelting regions. A particularly significant example concerns an iron currency bloom discovered at Aa in northeastern Estonia, whose slag inclusion chemistry closely matches that of the Saunakünka smelting site. This represents the first successful provenance attribution of an iron artefact in Estonia and demonstrates the potential of provenance analysis to reconstruct trade networks, production systems, and regional economic connections. Furthermore, provenance studies offer new possibilities for refining chronologies by linking undated iron objects to well-dated smelting sites or connecting well dated objects with smelting sites of unknown operating period.

Research into archaeological iron is inherently interdisciplinary with questions concerning material composition, manufacturing technology, and provenance forming an inseparable analytical framework. Although destructive methods must be justified carefully, the information gained often outweighs the loss of material. By combining metallography with advanced chemical and statistical techniques, archaeometallurgical research can provide insights into ancient iron production, technological knowledge, and exchange networks.

Keywords: archaeometallurgy, metallography, iron smelting, iron, slag