

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

Kristo Oks

EESTI MUISTNE RAUATOOTMINE: PAIGAD, TOODANG JA PROTSESS

Magistritöö

Juhendaja: PhD Ragnar Saage

Tartu 2025

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Rautatööpaikade ja kaubaraua kaardistamine	10
1.1. Rautatööpaigad Eestis	11
1.2. Kaubaraud ja selle leiukohad Eestis.....	18
2. Metallograafiline analüüs.....	22
2.1. Metoodika.....	22
2.2. Sepikodade šlakid.....	23
2.2.1. Käku sepikoda Saaremaal (14.–17. sajand).....	23
2.2.2. Tarvastu ordulinnuse sepikoda Viljandimaal (14.–16. sajand)	24
2.3. Rauasulatuskohtade šlakid	26
2.3.1. Tindimurru rauasulatuskoht Tartumaal (1. sajand eKr – 2. sajand pKr).....	26
2.3.2. Rihula rauasulatuskoht Lääne-Virumaal (8.–10. sajand)	27
2.3.3. Tuiu rauasulatuskoht Saaremaal (8.–15. sajand)	28
2.4. Ebakindla määranguga rautatööpaigad	28
2.4.1. Patjala rautatööpaik Jõgevamaal (14.–15. sajand).....	28
2.4.2. Kõpu rautatööpaik Hiiumaal (10.–12. sajand).....	30
2.4.3. Mägipe rautatööpaik Hiiumaal	32
2.4.4. Toila rautatööpaik Ida-Virumaal (4.–2. sajand eKr)	33
2.4.5. Lalli rautatööpaik Tartumaal	34
2.4.6. Patküla rautatööpaik Valgamaal	35
2.5. Kaubaraua analüüs	36
2.5.1. Aa küla kaubaraud	36
2.5.2. Alulinna kaubaraud.....	37
2.5.3. Varja kaubaraud.....	38
2.5.4. Metsamägara kaubaraud	38
2.5.5. Praaga kaubaraud.....	39
2.5.6. Ollepa kaubaraud	40
2.5.7. Sürgavere kaubaraud	41
2.6. Toorraua analüüs	42
2.6.1. Tindimurru toorraud (1. sajand eKr – 2. sajand pKr).....	42
2.6.2. Rihula toorraud (8.–10. sajand)	43
2.6.3. Tuiu toorraud (13.–14. sajand)	44

3. Rauasulatusprotsess: arheoloogia ja katsed	45
3.1. Rauasulatuseksperimendid Eestis	45
3.1.1. Esimene faas: 1970. aastate lõpp	45
3.1.2. Teine faas: 1980.–1990. aastad	47
3.1.3. Kolmas faas: 21. sajand	48
3.2. Rauasulatusprotsess	51
3.2.1. Tooraine varumine	51
3.2.1.1. Savi	51
3.2.1.2. Rauamaak	52
3.2.1.3. Puusüsi	53
3.2.1.4. Rübusti	54
3.2.2. Eeltööd	55
3.2.2.1. Ahju püstitamise ja ahjutüübid	55
3.2.2.2. Maagi eeltöötlemine	57
3.2.2.3. Väliääsi ehitamine	58
3.2.3. Raua sulatamine	59
3.2.3.1. Maagi ja söe lisamine	59
3.2.3.2. Ahjus toimuvad protsessid	60
3.2.3.3. Šlaki väljalaskmine	61
3.2.3.4. Raua väljavõtmine ja esmane sepistamine	62
4. Süntees	65
4.1. Rauasulatuskohad ajas ja ruumis	65
4.2. Šlakkide eripärad ja toodangu iseloom	67
4.3. Eksperimendid ja reaalsus – tähelepanekuid tulevikuks	70
Kokkuvõte	73
Kasutatud allikad ja kirjandus	76
Summary	83
LISAD	
Lisad: tabel 1	
Lisad: tabel 2	
Lisad: fotod	

Annotatsioon

Magistritöö käsitleb Eesti muinas- ja keskaegset rauatootmist, hõlmates nii rauasulatuskohtade kui ka kaubaraua kaardistamist, šlaki ja raua metallograafilist analüüsi ning rauasulatuseksperimente. Töö käigus kanti kaardile kõik Eestis seni teada olevad muistsed rauatööpaigad ja kaubaraualeiud ning arutati rauasulatuskohtade ruumilise ja ajalise leviku üle. Metallograafilise analüüsi abil loodi rauasulatus- ja sepašlakkide karakteristika, mis võimaldaks neid muistiseid teineteisest šlaki mikrostruktuuri põhjal eristada. Samuti iseloomustati kohaliku rauatoodangu kvaliteeti. Rauasulatuskatsete abil rekonstrueeriti rauataandamisprotsess Tuiu-tüüpi ahju näitel. Seeläbi viidati ka eksperimentaalarheoloogiale kui olulisele meetodile muistsete töövõtete mõistmisel.

Märksõnad: rauasulatus, eksperimentaalarheoloogia, metallograafia, raud, šlakk;

Sissejuhatus

Käesolev magistritöö käsitleb Eesti muistset rauatootmist, pöörates tähelepanu rauatööpaikadele, nende leiuainesele ja toodangule ning rauasulatusprotsessile. Pealkirjas seisev *muistne* ei viita ainult muinasajale, vaid seda kasutatakse kui viidet väga vanale ajale. Selle mõiste alla kuulub periood eelrooma rauaajast, millal algas kohalik rauatootmine, kuni 15. sajandini (k.a), millal see tinglikult lõppes. Töös leiavad põgusalt käsitlust ka mõned metallitööpaigad, mille dateeringud kuuluvad märksa hilisemasse aega, kuid töö põhifookuse seisukohast ei oma need piisavalt suurt tähendust, et uuritavat kronoloogiat 19. või isegi 20. sajandini pikendada.

Töö laiemaks eesmärgiks on mõista paremini muistset rauatootmist tuginedes uutele andmetele ja uuringutele. Selle eelduseks on Eesti rauasulatuskohtade ja nende toodangu mitmemõõtmeline kaardistamine, mis hõlmab nii nende ruumilist kui ka ajalist levikut. Teiseks eelduseks on teemakohase leiumaterjali metallograafiline analüüsimine. Viimaks kaasatakse teemakäsitlusele ka rauasulatuskatsed, mis on kõige otsesemaks meetodiks protsessi enese mõistmisel ja mõtestamisel. Magistritöös vastatakse järgnevatele uurimisküsimustele:

- Milline on rauasulatuskohtade ruumiline ja ajaline levikumuster Eestis?
- Kas šlaki füüsiliste omaduste põhjal on võimalik eristada rauasulatuspaiku sepatööpaikadest? Kui jah, siis kuidas? Kui ei, siis milliseid lisateadmisi on vaja nende eristamiseks?
- Millist rauda tootsid Eesti muistsed rauasulatajad?
- Kuidas aitavad eksperimendid mõista paremini muistset rauasulatusprotsessi?

Metallitööpaikade ja kaubaraua kaardistamisel koguti teavet mitmest erinevast allikast. Suurema jao tabelis (Lisad, tabel 1) kajastuvatest objektidest koondas allakirjutanu kataloogi juba neli aastat tagasi projekti POST126 (vt allpool) raames. Selle aluseks oli Jüri Peetsi monograafia *The power of iron* (2003), kust leiame seni viimase publitseeritud ülevaate arheoloogiliselt uuritud Eesti rauasulatuskohtade ruumilisest levikust. Seevastu on uurimata rauasulatuskohad jäänud seni tähelepanu alt välja. Suur osa metallitööpaikadest pärinevad Tartu ülikooli arheoloogia infosüsteemist ARHUT¹, kus on Tartu ülikoolis kodeeritud

¹ ARHUT-i link on kasutatud veebiallikate loendis.

leiuteated, mis pärinevad osalt suulisel pärimusel ja kirjalikel teadetal, osalt aga arheoloogilistel välitöödel. Kodeerimata arheoloogiateateid käesolevas töös ei kasutata. Tartu ülikooli arheoloogia andmebaasist TARA on kaasatud objektid, mille muistiseliigiks on määratud *rauasulatuskoht*. Töös kajastuvad ka mitmed linnused või asulakohad, mida pole küll andmebaasides rauasulatuskohaks määratud, kuid mida on šlaki ja muude rauatööle viitavate leidude tõttu raua tootmis- ja töötluspaikadena käsitletud arheometallurgid ja teised uurijad. Metallidetektorite üha intensiivsema kasutamisega kaasnevalt on leitud juurde hulgaliselt šlaki ja raua leiukohti, mille üle peab arvet Muinsuskaitseamet. Uuematest detektorileidudest on kaasatud töösse kõik kaubaraua leiukohad. Šlaki leiupaikadest on kaasatud vaid objektid, mis kajastuvad Tuuli Kurisoo Leiuatlases² ning mille kohta on koostatud eksperthinnangud.

Metallograafilise analüüsi allikaks on Tartu ülikooli arheoloogia laboris tehtud mikrolihvid mitmete Eesti metallitööpaikade šlakist ja rauast. Võrdlusmaterjali on leitud nii Eesti kui ka välismaiste autorite uurimustest. Rauasulatuskatsete allikabaasi moodustavad põhiosas populaarteaduslikud artiklid, kuna teaduspublikatsioonides ei ole eksperimendid kuigi põhjalikku käsitlust leidnud. Ainsaks teadustekstiks on Jüri Peetsi *The power of iron* (2003), milles on pühendatud peatükk Arvi Lauringsoni ja autori enda rauasulatuskatsetele. 21. sajandil toimunud eksperimentide allikaiks on populaarteaduslikud artiklid, alates 2021. aastast on mitmete Ragnar Saage katsete puhul autoril kasutada ka isiklikud kogemused ja tähelepanekud.

Käesolev magistritöö panustab Eesti muistse metallurgia uurimisloosse mitmel eri moel. Esiteks pole 2003. aastast saati koostatud ühtegi teaduspublikatsiooni, mis kajastaks kõiki praeguseks teadaolevaid rauasulatuskohti, sepikodasid ja kaubaraua leiukohti. Metallurgiaalaseid teadustekste ja lõputöid on Eestis ilmunud mitmeid, kuid need keskenduvad enamasti mõnele kindlale objektile, nagu näiteks sepikojad (vt Saage 2013, Oks 2022), või uurimismeetodile, nagu näiteks raua päritolu määramine (vt Jegorov 2023). Teisalt pole Eestis varem keskendunud šlaki süvitsi uurimisele, et püüda selle abil eristada rauasulatuskohti ja sepikodasid. Kolmandaks ei ole Eesti rauasulatuskatseid varem teaduspublikatsioonides kajastatud (v.a Peets 2003), et püüda nende abil rekonstrueerida muistset rauasulatusprotsessi. Käesolev töö püüab korvata kõiki eelmainitud puudujääke, aga püstitada ka uusi uurimisküsimusi ja hüpoteese.

² Kurisoo, T. Leiutatlas. Link on kasutatud veebiallikate loendis.

Töö jaguneb neljaks peatükiks ja selles leiavad käsitlust kolm nähtust. Esimese peatüki märksõnaks on *kohad* ja see keskendub rauatööpaikade ning kaubaraua ruumilisele kaardistamisele. Selle peatüki eesmärgiks on kanda kaardile suurem osa 2025. aasta aprilliks teada olnud rauatööpaiku, mille alla kuuluvad nii rauasulatuskohad, sepikojad kui ka määramata šlaki leiupaigad, mis viitavad eeldavalt koha peal toimunud rauatööle. Samuti kantakse kaardile kaubaraua leiukohad, et illustreerida nende arvukuse ja geograafilise leviku hetkeseisu. Teise peatüki märksõnaks on *toodang* ja see keskendub rauatööpaikade leiuainese, peamiselt šlaki metallograafilisele analüüsile, et iseloomustada seeläbi rauajätete füüsilisi omadusi ning püüda seeläbi eristada sulatusšlakki sepašlakist. Samuti käsitletakse ka kohaliku toor- ning kaubaraua metallograafiat, et iseloomustada siinset rauatoodangut, selle omadusi ja kvaliteeti. Kolmanda peatüki märksõnaks on *protsess* ning selles keskendutakse kohaliku rauatootmisprotsessi rekonstrueerimisele Tuuu-tüüpi ahju põhjal. Ülevaade antakse ka Eestis toimunud rauasulatuseksperimentidest ja nende käigus õpitust. Neljas peatükk on süntees, mille käigus vastatakse varem püstitatud uurimisküsimustele ning tuuakse välja uued küsimused ja hüpoteesid. Sünteesile järgneb kokkuvõte, allikate loetelu, resümee ja lisad. Kõikide jooniste, tabelite ja fotode autor on allakirjutanu, kui pole märgitud teisiti.

Uurimisseis

Kohaliku rauasulatusvõimalikkusele viitasid baltisaksa uurijad juba 19. sajandil, kui nende tähelepanu köitsid Tuuu Rauasaatmemäed Saaremaal, mida seostati tollal rootsi kaevandajatega (Peets 2003, 18). Mandril viitas kohalikule rauatootmisele esmakordselt 1887. aastal Constantin Grewingk, kes seostas Saunakünka rauasulatuskoha šlakirohkust lähedal asuva Punasoo ja seal leiduva soomaagiga (Grewingk 1887, 164)³.

Eesti šlakide analüüsimine sai alguse 1901. aastal, kui keemiaprofessor Gustav Tammann ja magister Georg Landesén võtsid vaatlusele kalmetest leitud rauašlakid (Lõugas 1988, 13). Analüüsi käigus tuvastati ränihappe suur sisaldus šlakis, mis muudab selle rasksulavaks, ning sellest tehti Eesti muinasmetsallurgiale oluline järeldus: uuritud šlakk ei saanud tekkida juhuslikult põllul tuleriidal vaid pidi sündima sulatusahjus (*ibid.*, 13–14). Niisiis viidati esmakordselt kohaliku rauatootmise võimalikkusele analüüsitulemuste põhjal. Paraku jäi räbu analüüsimine seejärel rohkem kui pooleks sajandiks soiku ning veel 20. sajandi

³ C. Grewingk kirjutas viidatud allikas järgnevalt: "...bei der Buschwächtere Sanna Köngas, viel Eisenschlacken gefunden, die sich sehr wahrscheinlich beim Verschmelzen des in der Nachbarschaft des rothen Moors vorkommenden Raseneisens bildeten."

lõpukümnenditel tehtud väheste proovide tulemused on jäänud pigem tagasihoidlikeks (*ibid.*). Šlakist enam tähelepanu on pälvinud erinevatest metallidest esemed.

Eesti arheoloogiliste raudesemete metallograafilise analüüsiga tegi 1950. aastate lõpul algust Riia Polütehnilise Instituudi õppejõud Aleksis Anteins, kes uuris peamiselt Baltimaade, sealjuures Eesti noorema rauaaja terariistade damaskimist (Lõugas 1988, 14). Oluline on ka mainida, et Anteins pööras esmakordselt tähelepanu soomaakide keemilise koostise eripäradele, eeldades, et need sisaldavad teatud elemente, mis satuvad sulatusel raua koostisesse ning mis on piirkonniti erinevad (*ibid.*). Ehkki Anteinsi eeldus osutus praktikas ebaõigeks (*ibid.*), on see siiski viide raua võimalikule päritoluanalüüsile – meetodile, mis on viimastel aastatel omandanud Eesti arheometallurgias olulise rolli (nt Jegorov 2023, Jegorov *et al.* ilmumas). 1970. aastail hakkas Anteinsi eeskujul Eesti damaskitud odaotsi uurima ENSV TA Ajaloo Instituudi vaneminsener A. Lääne (*ibid.*, 15). Paraku jäid peale Anteinsi ja Lääne püüdlusi metallograafilised uuringud veel enam kui kümneks aastaks soiku. Alates 1985. aastast sai muistne rauametallurgia Jüri Peetsi peamiseks uurimisvaldkonnaks (Peets 2003, 20). Oma karjääri jooksul on ta analüüsinud kümneid kirveid, vikateid, sirpe, tuleraudu, sadu nuge nii Eestist kui Soomest, ja koostanud tulemustest mahuka ülevaate oma doktoritöös (*ibid.*, 199–266).

Eesti kohalike rauasulatuskohtade arheoloogilise uurimisega tegi esimesena algust Aita Kustin 1962. aastal, kui ta uuris Saaremaal Tuiu Rauasaatmemägedes asuvat rauasulatuskeskust (Aaloe ja Kustin 1966, 162–165). 1969. aastal uuriti ka Tuiust paari kilomeetri kaugusel asuvat Tõrise rauasulatuskohta (Mäesalu ja Valk 2006, 145). Mõlemaid objekte on hiljem põhjalikumalt käsitlenud ka Jüri Peets (2003). 1960. aastate lõpul uuris Vello Lõugas Rae ja Jüri rauasulatuskohti Tallinna lähistel (Lõugas 1969, 27; Lauringson 1995, 10–11) ning pani aluse nende süstemaatilisele otsimisele ja registreerimisele (Peets 2003, 18). 1980. aastate alguses tegi rauatootmiskohtade uurimisega algust Ain Lavi, kes keskendus Ida-Eesti muististele (Peets 2003, 20), sealhulgas Põhja-Tartumaa rauatööl muinas- ja keskajal (Lavi 1999). Peale metallurgia-huviliste uurijate on rauasulatuskohtadega tegelema pidanud ka mitmed teiste huvidega arheoloogid. 1978–1986 aastatel teostas Olustvere asula- ja rauasulatuskohal välitöid Vladimir Sokolovski (Peets 2003, 63–64). 1980–1992 aastail uuriti Silvia Laulu juhatusel Siksälä Kabelimäe ja lähedalasuvat muinasasulat, kus mõlemalt objektilt leiti ka rauataandamise jälgi (*ibid.*, 64–67). 1993. aastal uuris Heiki Valk Kalatsova asula- ja rauasulatuskohta Setomaal (*ibid.*, 67–68). 1980. aastate keskpaigust hakkas Eesti

rauatootmiskohtade uurimisega tegelema Jüri Peets, kes tegi suuremahulisi välitöid Saaremaal Tuius ja Tõrisel ning Paatsa sepikojaasemel (Mäesalu ja Valk 2006, 145; Peets 2003, 99–130; 181–191). Ta on uurinud ka mitmeid analoogseid objekte Mandri-Eestis (Mäesalu ja Valk 2006, 145). 21. sajandil on rauasulatuskohtade uurimisega tegelenud Mauri Kiudsoo (Kiudsoo 2009; 2017) ja Ragnar Saage (Jegorov *et al.* 2023; Unt *et al.* 2023).

Eesti muinasmetallurgia uurimisel tuleb avaldada tänu ka kodu-uurijatele ja teistele asjahuvilistele, kellel küll puuduvad arheoloogia kui distsipliiniga akadeemilised sidemed, kuid jätkub see-eest tahet ja huvi minevikuradu uurida ja neid ka laiema avalikkuse ette tuua. Oskar Raudmetsa nimi ei vaja Eesti arheoloogidele ilmselt pikemat tutvustamist. Tegu oli teeneka kodu-uurijaga, kes on arheoloogide kasuks leidnud muljetavaldava hulga erinevaid muistiseid. 1990. aastaks oli ta leidnud vähemalt 327 kultusekivi, 155 asulakohta, 72 kivist kalmet, 20 rauasulatuskohta ja muidki muistiseid (Lauringson 1995, 13–14). Raudmetsa eestvedamisel avastati 1965. aastal juhuslikult rauasulatuskoht Jüri kiriku lähedal, 1967. aastal leiti teine analoogne tööpaik Rae raba ääres (Raudmets 1978, 26). Rauasulatamiskohtade kaardistamisega Alutagusel on tegelenud geograaf ja kartograafia ajaloolane Endel Varep (Varep 1970, 46–47). Erilist tänu tuleb avaldada ehitusinsener Arvi Lauringsonile, kelle sügav huvi Eesti esiajaloo ja rauametallurgia vastu andis alust arvukateks raua-teemalisteks publikatsioonideks (1978, 1995) ning pani ühtlasi aluse Eesti rauasulatuskesperimentide aegreale.

Seotud projektid ja tänusõnad

Käesoleva magistritöö valmimist on toetanud Postimehe Fondi Noor-Eesti teadusgrant “Eesti rauametallurgia kõrgaeg ja hääbumine 12.–14. sajandil” (POST126), Haridus- ja Teadusministeeriumi finantseeritud projekt “Raua päritolu määramise alusuuring Eestis” (EKKD-TA9) ning SA Eesti Teadusagentuuri rahastatud rühmagrant „Eesti 12.-14. sajandil: kohalik ühiskond, traditsioonid ja kultuur muutuste ajastul“ (PRG1931).

Autor avaldab erilist tänu oma juhendajale asjakohaste suuniste ja nõuannete eest, samuti Ragne Kangrole (Muinsuskaitseamet), Riina Juurikule (TÜ) ja Mari-Liis Postile (TLÜ) vajalikele andmetele ligipääsu tagamise eest. Viimaks tänab autor Mirte-Liisa Kurmi keelelise korrektuuri tegemise eest ja kõiki muinasmetallurgia-huvilisi, kes panustavad selle uurimisse ja populariseerimisse igauks ise moel.

1. Rauatööpaikade ja kaubaraua kaardistamine

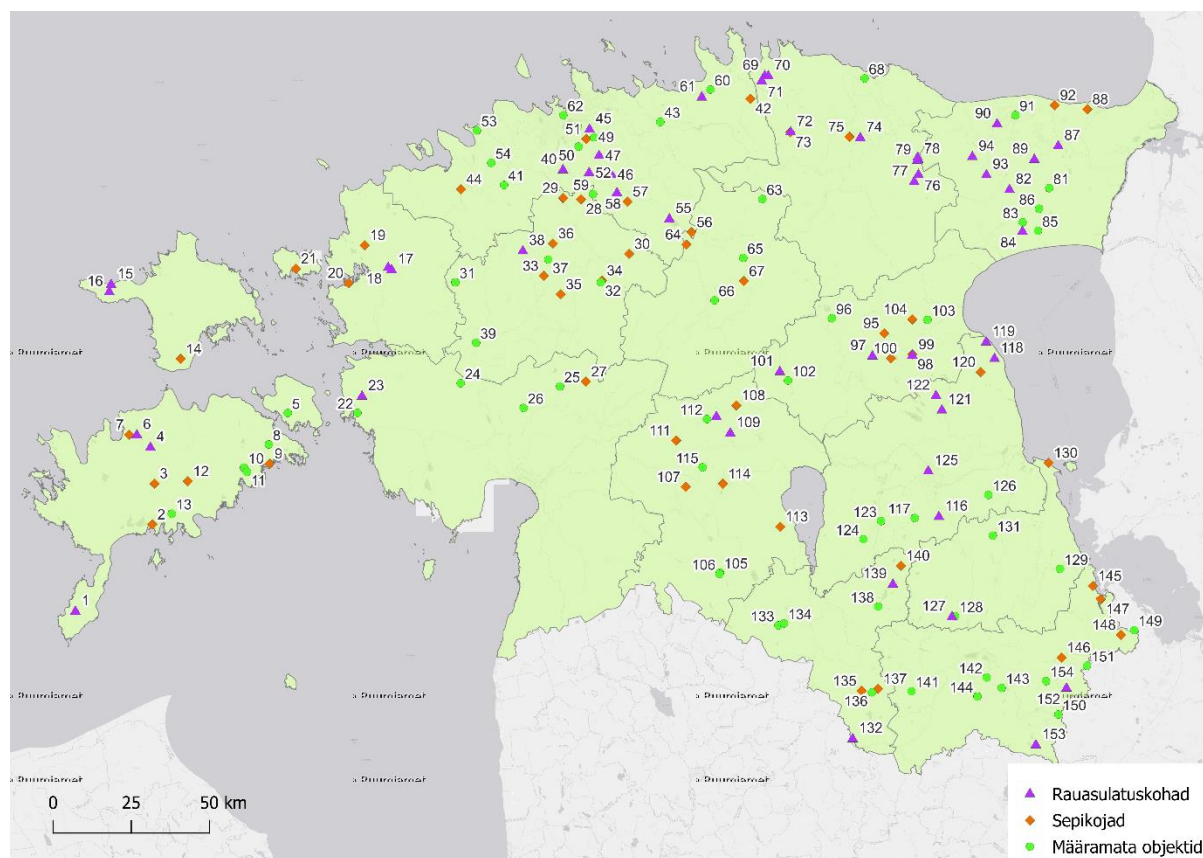
Jüri Peetsi monograafia *The power of iron* ilmumisest 2003. aastal on möödas juba üle 20 aasta. Selle ajaga on tehtud olulisi edusamme Eesti rauametallurgia uurimisos. Uute avastuste ja hüpoteeside kõrval on juurde lisandunud ka suur hulk arheoloogilist ainet, mis võimaldab kohalikku rauatööd senisest põhjalikumalt uurida.

Järgnevalt antakse statistiline ülevaade rauatööpaikadest Eestis, milles eristatakse rauasulatuskohti, sepatööpaikasad ja määramata rauatööpaiku. Detailsem info kõikide objektide kohta on esitatud tabeli kujul lisas 1, millele viidatakse iga eraldi välja toodud objekti juures. Andmed on esitatud maakondade kaupa lähtudes 2025. aasta esimese kvartali haldusjaotusest – see on n-ö kaasaegne mõõde, et lugejal oleks lihtsam objekte positsioneerida. Maakonnad on järjestatud nii, et objektide järjekorranumbrid suureneks pilguga mööda kaarti liikudes enam-vähem sujuvalt, alustades saartelt, liikudes üle Ranniku- ja Kesk-Eesti Virumaale ning sealt lõuna suunas, kuni jõutakse Võrumaa kohale. Maakondade-siseselt eristatakse töös ka kihelkondi, mis annab objektide paiknemisele ka ajaloolise mõõtme, kuna erinevalt maakondadest ei ole kihelkonnapiirid enam muutlikud. Kuna kihelkondi on palju, järjestati need allakirjutanu ajanappuse tõttu tähestikuliselt – tõsi, see teeb kaardil punktide järgnevuse pisut kaootilisemaks, kuid lõppeks on kõige olulisem, et objektid kajastuksid kaardil ning neid oleks võimalik tabelis (Lisa 1) oleva teabega kokku viia.

Objektide klassifitseerimisel on need jaotatud kategooriate *kindel*, *oletatav* ja *väga kahtlane* vahel. Selliste kategooriatega on muististe liigikindlus määratud ARHUT-is. Kuna käesoleva töö huvikeskmes on rauatootmiskohad, ei pöörata detailset tähelepanu kõikidele sepikodadele ja määramata rauatööpaikadele, ehkki mõndadel neist on oma seosed mõne tootmiskohaga. Arutlus rauasulatuskohtade ruumilise paiknemise ja dateeringute üle on koondatud sünteesivasse peatükki 4.1. Kaartide koostamisel kasutati programmi *Quantum GIS*⁴ (edaspidi QGIS).

⁴ Versioon: QGIS Desktop 3.34.7.

1.1. Rauatööpaigad Eestis



Joonis 1. Kõik töös kajastuvad objektid (Lisad, tabel 1) Eesti kaardil. Taustal on ESRI helehall põhikaart, mille peal on heleroheline Eesti maakonnakaart (Maa- ja Ruumiamet).

Saare maakonnas on 13 rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 1–13; joonis 1), millest kolm on kindlad rauasulatuskohad ja viis kindlad sepikojad. Määramata rauatööpaiku on viis, neist kolm on oletuslikud ja kaks väga kahtlased. Viimati mainitud objektid (nr 10 ja 11) asuvad mõlemad Põide kihelkonnas Kahtla külas ja kannavad Kultuurimälestiste registris nime „Musta mulla mägi“. Objektid on omal ajal võetud muinsuskaitse alla kui võimalikud metallitööpaigad, kuid leidude täielik puudumine ei võimalda neid siiski kindlate ega oletuslike rauatööpaikade hulka arvata. Rauasulatuskohtadest tuntuimad on Tuiu ja Tõrise (nr 6 ja 4) Kaarma ja Mustjala kihelkonnas, millest tuleb töös veel siin-seal juttu. Tuiu kompleksist on tehtud palju radiosüsiniku dateeringuid, mis ajaldavad sealse rauatootmise 8.–15. sajandisse (Peets 2003, 102, tabel 6), Tõrise on Tuiuga samaaegne ja dateerub 10.–14. sajandisse (*ibid.*). Neile lisandus 2011. aastal Sõrve poolsaarel Jämaja kihelkonnas Torgu-Mõisakülas asuv rauasulatuskoht (nr 1), mida arheometallurgide ringis Iide rauasulatuskohana tuntakse. Objektile andis naaberküla järgi nime Jüri Peets, kes sealseid välitöid juhatab. Radiosüsiniku

dateering ajaldas sealse šlakirohke kultuurkihi 10.–12. sajandisse.⁵ Sepikodadest on paremini uuritud Paatsa sepikoda Mustjala kihelkonnas (nr 7), mis on dateeritud põhiosas 11.–14. sajandisse (Peets 2003, 190, tabel 9), ja Käku sepikoda Kaarma kihelkonnas (nr 3), mis pärineb 14.–17. sajandist (Saage 2013, 16, tabel 1).

Hiiu maakonnas on kolm rauatööpaika, mis kõik on muinsuskaitse alla võetud kui rauasulatuskohad (Lisad, tabel 1: nr 14–16; joonis 1). Ühelgi nendest objektidest ei ole teostatud põhjalikumaid probleemuuringuid, mis lubaks nende liiki paremini määrata, kuid hilisema leire käigus kogutud materjal võimaldab siiski esialgseid hinnanguid anda. Reigi kihelkonnas Kõpu poolsaarel asuvad Kõpu (nr 16) ja Mägipe (nr 15) rauasulatuskohad, mille liigikindlust käsitletakse pikemalt peatükis 2.4. Kõpu objektilt korjatud malmitüki radiosüsiniku dateering ajaldas selle 10.–12. sajandisse⁶. Emmaste kihelkonnas asub Prassi (nr 14) rauatööpaik, millelt korjatud malmitüki radiosüsiniku analüüs ajaldas selle 19.–20. sajandisse⁷. Kuigi objekt on võetud muinsuskaitse alla kui rauasulatuskoht, võiks seda dateeringu poolest siiski pigem sepikojaks pidada.

Lääne maakonnas on viis rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 17–21; joonis 1), neist kaks on kindlad rauasulatuskohad ja kolm sepikojad, millest üks on kindel ja kaks oletuslikud. Mõlemad rauasulatuspaigad asuvad lähestikku Lääne-Nigula kihelkonnas Uugla külas (nr 17 ja 18), kuid allakirjutanu hinnangul võiks neist rauatootmisega seotuks pidada vaid üht (nr 17), mille Mati Mandel on dateerinud 11.–14. sajandisse (Mandel 2007, 5). Teine, Uugla mõisa lähedal paiknev objekt (nr 18), on Mandeli hinnangul tõenäoliselt Uugla sepapere elupaik (Mandel 2008, 10), mis on ARHUT-is võib-olla liiga ennatlikult kindlaks rauatootmiskohaks määratud. Käesolevas töös kajastub see siiski rauasulatuskohana.

Pärnu maakonnas on kuus rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 22–27; joonis 1), millest kaks on kindlad rauasulatuskohad, üks kindel sepikoda ja kolm määramata rauatööpaigad, millest üks on kindel ja kaks oletuslikud. Esimene rauasulatuskoht asub Hanila kihelkonnas Rame külas (nr 22) ja sealt on leitud rauamaaki ning šlakki. Objekt on ARHUT-is määratud kindlaks rauasulatus- ja töötlemiskohaks, kuid allakirjutanu hinnangul on sealne leiumaterjal liiga napp objekti liigi(kindluse) määramiseks. Teine rauasulatuskoht asub Karuse kihelkonnas Kõmsi külas (nr 23). Ka sealt on leitud üksnes šlakki, kuid objekt on võetud muinsuskaitse alla.

⁵ Tln-3481, 983 ± 55 BP, 971–1188 AD. Kogu info Iide rauasulatuskoha kohta pärineb Ragnar Saage suulisel teadaandel.

⁶ Ua-86019: 1008 ± 49 BP, 973–1161 AD cal. 95,4%.

⁷ Ua-86018, 99 ± 25 BP, 1809–1923 AD cal. 95,4%.

Määramata rauatööpaikadest nimekaim on Soontagana linnus Mihkli kihelkonnas Kurese külas (nr 24), kust on leitud šlakki ja tiiglikatkeid, mis viitavad kohapealsele metallitööle.

Rapla maakonnas on 12 rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 28–39; joonis 1), millest üks on kindel rauasulatuskoht, kolm on kindlad ja neli oletuslikud sepikojad, ning kaks kindlad ja kaks oletuslikud määramata rauatööpaigad. Rauasulatuskohaks loetakse siinkohal Varbola Jaanlinna linnust (nr 38), kust on leitud arvukalt šlakki ja teisi tõendeid kohapealsest rauatootmisest⁸.

Harju maakonnas on 23 rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 40–62; joonis 1), millest üheksa on kindlad ja üks oletuslik rauasulatuskoht, üks kindel ja neli oletuslikud sepikojad ning üks kindel ja seitse oletuslikud määramata metallitööpaigad. Rauasulatuskohtadest mainekamad on Rae ja Karla (nr 45 ja 49; viimast tuntakse nime poolest siiski Jüri rauasulatuskohana) Jüri kihelkonnas, mida peetakse ühtlasi Eesti vanimateks rauatootmiskohtadeks pärinedes ajavahemikust 1. sajand eKr kuni 1. sajand pKr (Peets 2003, 63). Jüri kihelkonnas asuvad veel Aruvalla (nr 46), Patika (nr 47), Peetri (nr 48) ja Sõmeru (nr 52) rauasulatuskohad. Hageri kihelkonnas asub Tõdva rauasulatuskompleks (nr 40), mis on dateeritud 9.–11. sajandisse⁹. Kose kihelkonnas asuvad Kiruvere (nr 55) ja Saula (nr 58) rauasulatuskohad. Kuusalu kihelkonnas asub Kahala rauasulatuskoht (nr 61). Määramata metallitööpaikadest võiks kindlasti mainida Tallinna linnas asuvat Pärnu mnt 41 objekti (nr 62), kust leitud šlakikuulid on ühed vanimad näited Eesti kohalikust rauatööst dateerudes 5.–4. sajandisse eKr (Niinesalu-Moon *et al.* 2023, 150). Allakirjutanu on teadlik, et Tallinna keskaegsetest kihtidest on samuti palju šlakileide, kuid käesolevas töös need ei kajastu, kuna Tallinna linna-siseselt ei ole kunagi ühtegi rauasulatuskohta tuvastatud. Seega jääb Pärnu mnt 41 objekt (nr 62) kaardil ainsaks rauatööpaigaks Tallinnas.

Järva maakonnas on viis rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 63–67; joonis 1), millest üks on kindel ja üks oletuslik sepikoda ning kolm oletuslikud määramata rauatööpaigad. Kindlaid rauasulatuskohti Järvemaal seni tuvastatud ei ole. Lisaks maapiirkonnas asuvatele šlaki leiupaikadele tasub eraldi mainida ka Paide ordulinnust (nr 66), kust on leitud vähemal määral šlakki.

⁸ Kiudsoo, M. 2023. Mitmekihiline Varbola: rauasulatuskohast “taanlaste” linnuseks. Ettekanne ajalookonverentsil “Eesti 1200: oma või võõras” 5. novembril 2023 Eesti Ajaloomuuseumis. Ettekande järelvaatamise link on kasutatud veebiallikate loendis.

⁹ Hela-1911, 1085 ± 30 BP, 890–1020 AD cal. 95,4% (Kiudsoo 2009, 100)

Lääne-Viru maakonnas on 13 rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 68–80; joonis 1), millest üheksa on kindlad ja üks oletuslik rauasulatuskoht, kaks kindlad sepikojad ja üks oletatav määramata rauatööpaik. Haljala kihelkonnas asuvad Ilumäe rauasulatuskohad (nr 69 ja 70), mis on dateeritud 12.–13. sajandisse¹⁰, ja nende kaasaegne Uusküla rauasulatuskoht (nr 71). Kadrina kihelkonnas asub Vaiatu rauasulatuskoht (nr 72), mille lähedalt leiti ka sepikoda (nr 73). Viru-Jaagupi kihelkonnas asuvad üsna lähestikku Palasi (nr 76) ja Saunakünka (nr 77) rauasulatuskohad, mille dateeringud üksteisest mõnevõrra erinevad: Saunakünka pärineb 8.–9. sajandist¹¹, sealt 2,6 kilomeetrit põhjakirdes asuv Palasi aga 12.–13. sajandist¹². Palasist vaid 4 kilomeetrit põhja pool Viru-Nigula kihelkonnas Kõrma külas asuvad Rihula I, II ja III rauasulatuskohad (nr 78–80). 2022. aastal uuriti Sander Jegorovi ja Ragnar Saage juhatusel Rihula II rauasulatuskohta, mis dateeriti radiosüsiniku meetodil 8.–10. sajandisse¹³. Sepikodadest on mainida veel Rakvere ordulinnus (nr 75), mille lõunapoolsest eelhoovist leiti kahest kõrvutiasuvast ruumist šlakki (Aus 1984, 64).

Ida-Viru maakonnas on 14 rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 81–94; joonis 1), millest seitse on kindlad rauasulatuskohad, kaks kindlad sepikojad ja kaks kindlad ning kolm oletatavad määramata rauatööpaigad. Iisaku kihelkonnas asuvad Metsküla (nr 82) ja Sälliku (nr 84) rauasulatuskohad. Neist põhjalikumalt on uuritud Metsküla objekti, mis on dateeritud 1.–3. sajandisse¹⁴. Jõhvi kihelkonnas asuvad Vasavere (nr 87), Pagari (nr 89) ja Roodu (nr 90) rauasulatuskohad. Kui Vasavere näol on tegu šlaki leiupaigaga, siis Pagari ja Roodu puhul puuduvad allakirjutanul täiendavad andmed, mis võimaldaks neid objekte põhjalikumalt käsitleda. Et need on kaitse alla võetud kui rauasulatuskohad, kajastuvad nad sel kujul ka käesolevas töös. Lüganuse kihelkonnas asuvad paremini uuritud Tarumaa (nr 93) ja Rebu (nr 94) rauasulatuskohad. Tarumaa on dateeritud 13.–14. sajandisse¹⁵, Rebu ulatub aga 14.–15. sajandisse¹⁶. Jõhvi kihelkonnas Toila alevikus asub üks vanimaid šlaki leiupaiku (nr 92), mis on dateeritud 4.–2. sajandisse eKr¹⁷. Kõnealuselt objektist tuleb peatükis 2.4. pikemalt juttu.

Jõgeva maakonnas on 10 metallitööpaika (Lisad, tabel 1: nr 95–104; joonis 1), millest kolm on kindlad rauasulatuskohad, kaks kindlad ja kaks oletuslikud sepikojad ning kolm oletatavad

¹⁰ Tln-2119, 803±67 BP, 1177–1286 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 87, tabel 5)

¹¹ Tln-2122, 1235±44 BP, 724–878 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 56, tabel 4)

¹² Tln-1009, 800±35 BP, 1160–1280 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 87, tabel 5)

¹³ UBA-50399, 1166±23 BP; 774–790, 802–811, 819–900, 917–974 AD (Jegorov *et al.* 2023, 112–113)

¹⁴ Tln-2622, 1876±38 BP, 79–213 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 56, tabel 4)

¹⁵ Tln-1543, 678±36 BP, 1278–1374 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 87, tabel 5)

¹⁶ Tln-1546, 487±56 BP, 1330–1460 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 87, tabel 5)

¹⁷ Poz-163739, 2190±30, 370–170 BC (Kriiska *et al.* ilmumisel)

määramata rauatööpaigad. Laiuse kihelkonnas asub Patjala rauasulatuskoht (nr 97), mis pärineb 14.–15. sajandist¹⁸. Palamuse kihelkonnas asub Varbevere rauasulatuskoht (nr 99; reg. 9305), mille lähinaabrusest on avastatud ka sepatööpaik (nr 98). Põltsamaa kihelkonnas asub Mõhküla rauasulatuskoht (nr 101), kust leiti 2024. aastal voolamisjälgedega šlakki, mis on allakirjutanu ja tema juhendaja hinnangul üsna kindlalt raua sulatamisel moodustunud. Määramata metallitööpaikadest tasub mainida Põltsamaa ordulinnust (nr 102), mille väravahoone juurest on kaevamiste käigus leitud šlakki, ja Torma kihelkonnas Torma alevis asuvat šlaki leiupaika (nr 103). Viimase puhul on muistiseliiiki keeruline määrata, kuna lisaks šlakile olevat sealt ka soorauda leitud. Kuna rahvasuus kutsutakse soorauaks nii rauamaaki kui ka rauatoorikuid, on keeruline oletada, millega täpselt tegu võiks olla.

Viljandi maakonnas on 11 metallitööpaika (Lisa 1, nr 105–115; joonis 1), millest üks on kindel ja üks oletuslik rauasulatuskoht, kaks kindlad ja kolm oletuslikud sepikojad, ning kaks kindlad ja kaks oletuslikud määramata metallitööpaigad. Suure-Jaani kihelkonnas asuvad Olustvere (nr 110; reg. 13256, asulakoht) ja Tääksi (nr 109) rauasulatuskohad. Olustvere kuulub vanimate rauatootmispaikade hulka, dateerudes I aastatuhande I poolde ehk rooma rauaaega. Tääksi liigikindlus on ARHUT-is määratud oletatavaks, kuigi sealt on leitud šlakki, toorrauda ja õhutusdüüside katkeid, mille alusel on Jüri Peets hinnanud Tääksi kindlaks rauasulatuskohaks. Sepikodadest tasub mainida Tarvastu kihelkonnas Tarvastu ordulinnuse eeslinnusel paiknenud sepikoda (nr 113), mida allakirjutanu on uurinud oma bakalaureusetöö raames (Oks 2022). Sepikojast leitud Rootsi importrauda ehk osmundi radiosüsiniku analüüs ajaldas selle 14. sajandisse¹⁹, kuid sepikoda võis kasutusel olla linnuse hävimiseni 16. sajandil (*ibid.*, 3). Ka Karksi kihelkonnas asuvalt Karksi ordulinnuselt (nr 106) on leitud šlakki. Ka Viljandi ordulinnuse vaimulikehoone lääneruumist leiti 2022. aastal šlakki (Valk 2023, 165), kuid kuna tegu on täitekihiga, ei hakatud seda objekti kaardile kandma. Allakirjutanu on teadlik, et Viljandist on rohkemgi šlakileide, kuid kuna ühtegi kindlat rauasulatuskohta linnast teada ei ole ja üks objekt Viljandi linnast on juba kaardil (nr 114), ei olnud töö põhifookuse seisukohast mõttekas igat šlakileidu linnast töösse kaasata. Linnustest väärrib veel mainimist Lõhavere linnamägi (nr 112) Suure-Jaani kihelkonnas, kust leitud šlakki ei ole seni põhjalikumalt uuritud.

¹⁸ Poz-189815, 550±30 BP, 1318–1360 AD, 1388–1434 AD cal. 95,4%.

¹⁹ Ua-77126, 675±25 BP, 1361–1388 AD cal. 95,4%.

Tartu maakonnas on 11 rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 116–126; joonis 1), neist kuus on kindlad rauasulatuskohad, üks oletatav sepikoda ning kolm kindlad ja üks oletatav määramata rauatööpaik. Kambja kihelkonnas asub Lalli rauasulatuskoht (nr 116), mida käsitletakse põhjalikumalt peatükis 2.4. Tegu on šlaki leiupaigaga, mille muistiseligi määramine on käesoleva töö üheks eesmärgiks. Kodavere kihelkonnas asuvad põhjalikumalt uuritud Punikvere (nr 118) ja Raatvere (nr 119) rauasulatuskohad. Punikvere on dateeritud 13.–14. sajandisse²⁰, Raatvere pärineb peaaesjalikult 10. sajandist²¹. Maarja-Magdaleena kihelkonnas asuvad Puiato (nr 121) ja Tindimurru (nr 122) rauasulatuskohad, mis on ühed vanimad Eestis: ajalisel mõnevõrra varasem Tindimurru pärineb 1. sajandist eKr kuni 2. sajandist pKr²², Puiato pärineb 1.–4. sajandist pKr²³. Tartu linnas ajaloolises Tartu-Maarja kihelkonnas asub Lossi tänava rauasulatuskoht ja sepatöökeskus (nr 125), kus raua tootmistegevus on dateeritud 14. sajandi algusesse²⁴, sepatöö aga juba 13. sajandisse²⁵. Käesolevas töös kajastub see objekt siiski vaid rauasulatuskohana, kuna see on töö põhifookust arvestades olulisem. Määranguta rauatööpaikadest tasub mainida Unipiha linnamäge (nr 117) Kambja kihelkonnas, Peedu Kerikmäe linnust (nr 123) Nõo kihelkonnas ja Uderna II asulakohta Rõngu kihelkonnas, kust on leitud šlakki. Unipiha ja Uderna leidsid äramainimist ka Jüri Peetsi monograafias, kui võimalikud rauasulatuskohad (Peets 2003, 68), kuid käesolevas töös on jäetud need määramata – põhjuseks kindla seisukoha puudumine varasemas historiograafias.

Põlva maakonnas on viis rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 127–131; joonis 1), millest üks on kindel rauasulatuskoht, üks oletatav sepikoda ning kaks oletatavad ja üks väga kaheldav määramata rauatööpaik. Kanepi kihelkonnas asub Soodoma rauasulatuskoht (nr 127), mille kohta pole allkirjutanul rohkemat teada, kui et sealt on leitud šlakki. Võnnu kihelkonnas asuvat Kärša küla rauatööpaika (nr 131) külastas omal ajal Arvi Lauringson, kes pidas seda kindlalt rauasulatuskohaks²⁶, kuid füüsilisel kujul ei ole sealt šlakki arheoloogiakogudesse jõudnud, mis ei võimalda Lauringsoni hinnangut kontrollida.

Valga maakonnas on üheksa rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 132–140; joonis 1), neist üks on kindel ja üks oletuslik rauasulatuskoht, kolm oletuslikud sepikojad, üks kindel, üks oletatav ja

²⁰ Tln-691, 660±60 BP, 1290–1390 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 87, tabel 5)

²¹ Tln-633, 1070±40 BP, 900–1020 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 56, tabel 4)

²² Tln-1071, 1925±35 BP, 19 BC–133 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 56, tabel 4)

²³ Tln-2135, 1812±50 BP, 125–325 AD cal. 68,3%; Tln-2138, 1861±53 BP, 75–250 AD cal. 68,3% (Peets 2003, 56, tabel 4)

²⁴ TA-2029, 490±50 BP, 1317–1494 AD cal. 95,4%. (Blehner *et al.* 2023, 87)

²⁵ UBA-47473, 796±24 BP, 1220–1273 AD cal. 95,4%. (Blehner *et al.* 2023, 89)

²⁶ Arheoloogiateade ID 54600 (ARHUT)

kaks väga kaheldavat määramata rauatööpaika. Hargla kihelkonnas asub Tsirgumäe Kõrgeperve rauasulatuskoht (nr 132), kust on leitud toorrauda ja šlakki. Otepää kihelkonnas Otepää linnamäe lähistel asub oletatav rauasulatuskoht (nr 139), kust on leitud šlakki ning jälgi sulatusahjust. Määramata rauatööpaikadest tasub mainida Patküla rauatööpaika (nr 134) Helme kihelkonnas, kust on leitud šlakki. Kõnealune objekt leiab pikemat käsitlust peatükis 2.4. Sealt mitte kaugel asuva Koorküla-Ingaste rauatööpaiga (nr 133) leidjad oletavad, et tegu on rauasulatuskohaga, kuid allakirjutanu otsustas selle objekti töös siiski määramata jätta, kuna pole saanud tutvuda sealt leitud šlakiga.

Võru maakonnas on 14 rauatööpaika (Lisad, tabel 1: nr 141–154; joonis 1), millest kaks on kindlad rauasulatuskohad, kaks kindlad ja kaks oletatavad sepikojad ning üks kindel, viis oletatavad ja kaks väga kaheldavad määramata rauatööpaigad. Setumaal asub Kalatsova rauasulatuskoht (nr 152), mis dateeriti keraamika põhjal 1.–5. sajandisse (Peets 2003, 68). Vastseliina kihelkonnas asub Siksälä Kabelimäe rauasulatuskoht (nr 152) ja sealt ligi 500 meetrit põhjakirde suunas asulakoht, kust on samuti leitud jälgi kohapealsest rauatootmisest. Mõlemad objektid on käesolevas töös arvatud kokku üheks kompleksiks, kuna dateeringu poolest on need üheaegsed, pärinedes keraamika põhjal 1.–5. sajandist (Peets 2003, 66–67). ARHUT-is on Siksälä Kabelimägi kirjas kui oletatav rauasulatuskoht, kuid tõendusmaterjali kohapealse tootmistegevuse kohta on piisavalt, et muistise liigikindlus võiks andmebaasis ka kindlamalt määratud olla. Määramata rauatööpaikadest väärrib mainimist Rõuge muinasasula (nr 144), mida on šlakileidude põhjal ka varem võimalikuks rauasulatuskohaks peetud (*ibid.*, 68). Objekt on Kultuurimälestiste registri andmetel dateeritud 6.–10. sajandisse.

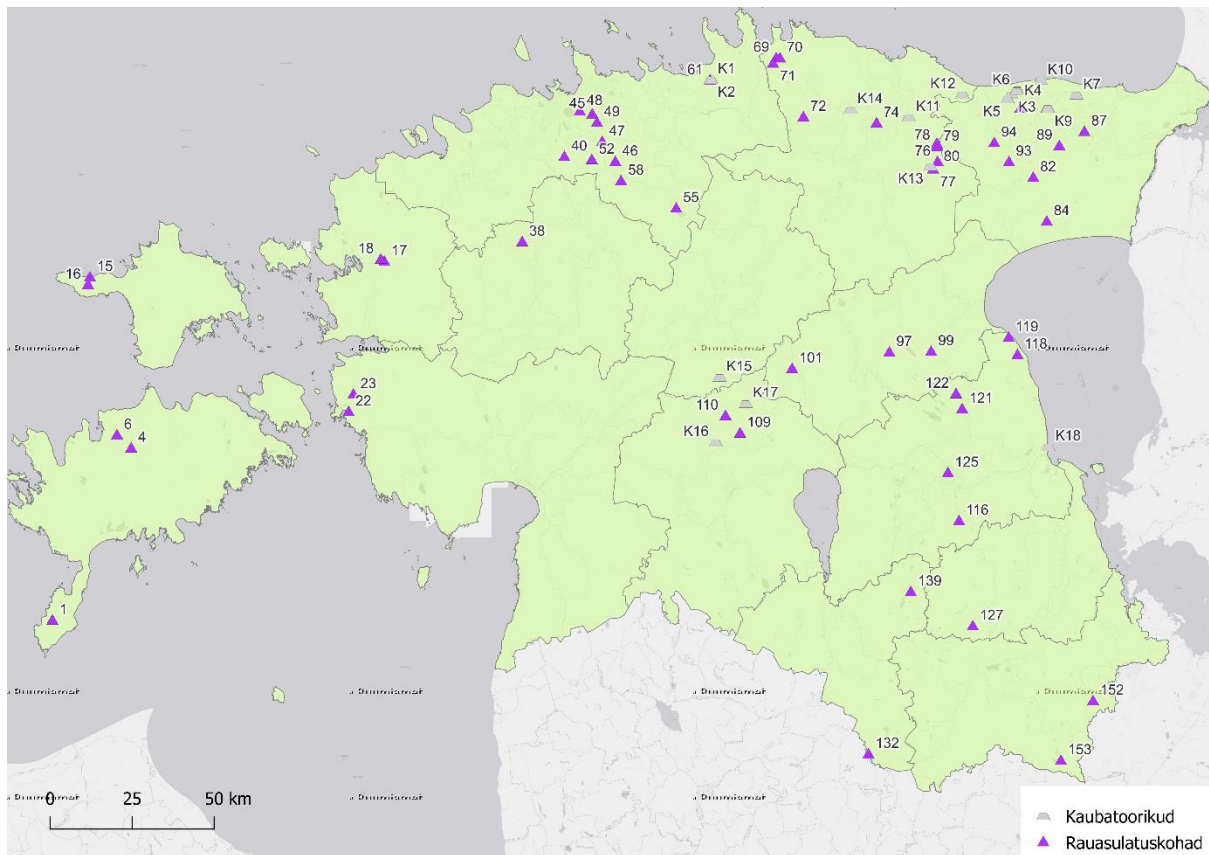
1.2. Kaubaraud ja selle leiukohad Eestis

Kaubaraud, mida ka kaubatoorikuks kutsutakse, on rauasulatuse lõpp-produkt, kui ahjust välja võetud poorne käsnaud kompaksemaks sepistatakse. Vasardamisel püütakse neile ka enam-vähem standardne kuju anda. 2003. aastaks oli Eestist teada vaid üks kaubaraua toorik, mis leiti Harjumaalt Kuusalu muinasasulakohta läbiva kaablitrassi kaevamisel. See oli 5–6 cm paksune, 10 cm läbimõõduga ja 2020 g kaaluv rauapäts, mis dateeriti ühes asulakohaga 12.–13. sajandisse. (Peets 2003, 154; tabel 1: K1) 2016. aastaks oli sellele lisandunud veel üks, 5,2 kg raskune ja 17 × 8 × 7 cm suurune vormileivakujuline rauatoorik, mis leiti eelnevast mitte kaugelt, Kuusalu lähistelt Kahala rauasulatuskohast (Kiudsoo 2016, 89; tabel 1: K2).



Joonis 2. Kaubaraua esinemisvormid Eestis: 1) Risttahuka-kujuline toorik Varja külast; 2) Poolsfääriline toorik Praaga asulakohast; 3) Ümmargune toorik Alulinna linnuse lähistelt; 4) Lõikejälgedega suur toorik Sürgavere külast. (Saage ja Oks, ilmumas)

Seoses metallidetektorite üha intensiivsema kasutamisega on viimase üheksa aasta jooksul leitud aga juurde hulgaliselt kaubatoorikuid, mille koguarv on 2025. aasta aprilli seisuga 42. Võrreldes 2016. aastaga on seega toimunud hüppeline kasv selle leiuliigi arvukuses, kuid kindlasti ei ole selle taga üksnes hobitsijate intensiivsem tegevus, vaid ka kaubaraua kui olulist kultuuriväärtust omava leiuliigi laiem teadvustatus ühiskonnas. On võimalik, et selliseid toorikuid on leitud ka juba varem, kuid neid pole kas ära tuntud või pole neis osatud näha olulist ajaloolist väärtust. Kaubaraua levinuim vorm on risttahuka kujuline, kuid leidub ka teistsuguse kujuga kaubatoorikuid (joonis 2; tabel 1), mida asjatundmatu silm ei tarvitse kohaliku rauatootmisega seostada.



Joonis 3. Kaubaraua leiupaigad ja rauasulatuskohad Eesti kaardil. Taustal on ESRI helehall põhikaart, mille peal on heleroheline Eesti maakonnakaart (Maa- ja Ruumiamet).

Kaubatoorikud on oluliseks uurimismaterjaliks arheometallurgidele, kuna annavad väärt teavet kohaliku rauatoodangu kvaliteedi ja sepa töövõtete kohta. Allakirjutanu on analüüsinud kaheksat, mille tulemused avaldatakse Jegorov *et al.* artiklis „A Pilot Study of Estonian Archaeological Iron Provenance“ ajakirjas *Journal of Archaeological Science*. Neist seitsme tooriku analüüsitulemused on esitatud ka peatükis 2.5. Allakirjutanu kogutud kaubaraua kaardistusandmed avaldatakse Saage *et al.* 2025 artiklis “Iron production and trade in Estonia from the 11th to 16th Century“ Rootsi Rauakontori (*Jernkontoret*) kogumikus *Baltic Metal Trade*. Allakirjutanu arutus kaubatoorikute kujude ja nende sepiamise eripärade üle avaldatakse Saage ja Oks artiklis „Blooms and experiments: learning the hard way from iron smelting”, mis avaldatakse AIE 2024 konverentsi teeside kogumikus *Conference Proceedings. Archaeometallurgy in Europe 2024 in Falun, Sweden*. Järgnevalt tehakse statistiline ülevaade kaubaraua ruumilisest levikust Eestis maakondade kaupa (joonis 3; tabel 1).

Harju maakonnast on leitud kaks kaubatoorikut, mida käesoleva peatüki alguses juba mainiti (tabel 1, K1–K2). **Lääne-Viru maakonnast** on leitud üheksa kaubatoorikut kokku neljast erinevast kohast (K11–K14), neist suurim, viie toorikuga kogum, avastati Rahkla külast (K11)

Rakvere lahingupaiga otsimisel 2023. aastal. **Ida-Viru maakonnast** on leitud kokku 22 kaubaraua toorikut kokku kaheksast kohast (K3–K10). Neist suurimad „rauaarded“ on leitud vähem kui kahe kilomeetrise raadiusega alast: Vooreperast kaks, Aa külast viis, Varja külast üheksa ja Alulinna linnuse lähistelt kaks kaubaraua toorikut. Neist suurim, Varja aare on ühest toorikust saadud terase abil dateeritud 11.–13. sajandisse²⁷. **Järva maakonnast** on leitud vaid üks kaubatoorik (K15). **Viljandi maakonnast** pärinevad viis toorikut kahest leiukohast (K16–K17), neist suurim, kolme toorikuga peitvara leiti Maalasti külast. **Tartu maakonnast** on leitud üks kolme poolsfäärilise toorikuga aare Praaga külast (K18).

Tabel 1. Kaubaraualeiud Eestis.

Number	Maakond	Leiukoht	Kuju	Kogus	Kaal	Viide
K1	Harju	Kuusalu	Poolsfääriline	1	2 kg	Peets 2003, 154
K2	Harju	Kahala	Risttahukas	1	5,2 kg	Kiudsoo 2016, 89
K3	Ida-Viru	Voorepera	Risttahukas ja poolsfääriline	2	1,57 ja 2 kg	Kiudsoo 2017c
K4	Ida-Viru	Aa	Risttahukad	5	1,2–1,9 kg	Kiudsoo 2017d
K5	Ida-Viru	Varja	Risttahukad	9	1,7–2,8 kg	Kiudsoo 2018a
K6	Ida-Viru	Alulinna	Kerajad	2	1,25 kg (väiksem)	Jegorov 2023
K7	Ida-Viru	Metsamägara	Risttahukas	1	?	Jegorov 2023
K8	Ida-Viru	Sompa	Poolsfääriline	1	1,4	OA 18522 ²⁸
K9	Ida-Viru	Sompa	Risttahukas	1	?	OA 16124
K10	Ida-Viru	Ontika	Poolsfääriline	1	668 g	OA 15916
K11	Lääne-Viru	Rahkla	Risttahukad	5	?	
K12	Lääne-Viru	Kestla	Risttahukas	1	?	OA 16794
K13	Lääne-Viru	Palasi	Risttahukad	2	4,4 kg (kokku)	OA 12392
K14	Lääne-Viru	Kloodi	Risttahukas	1	?	OA 15400
K15	Järva	Ollepa	Poolsfääriline	1	u 1 kg	Jegorov 2023
K16	Viljandi	Sürgavere	Risttahukas ja raiejälgedega	2	2,4 ja 3,4 kg	Jegorov 2023
K17	Viljandi	Maalasti	Risttahukad	3	1,2–2,5 kg	Jegorov 2023
K18	Tartu	Praaga	Poolsfäärilised	3	3–4,3 kg	Jegorov 2023
KOKKU:				42		

Joonisel 3 on näha, et suur hulk kaubaraua leide on koondunud Lääne- ja eriti Ida-Virumaale, kus on Eesti mõistes ka kõige enam rauasulatuskohti. Virumaale kui suurele rauatootmispiirkonnale on viidatud juba varem (nt Peets 2003, 84), ent nüüd on ka raua päritoluanalüüsid kinnitanud, et mitmed Virumaa kaubatoorikud (Aa, Alulinna, Metsamägara

²⁷ Ua-77127, 865±27 BP, 1052–1078, 1156–1230, 1243–1258 AD cal. 95,4% (vt ka Jegorov 2023, 26).

²⁸ OA ehk otsinguvahendiga otsimise aruanne. Aruanded on Muinsuskaitseametis.

ja Varja) sarnanevad oma keemiliselt koostiselt väga ja on arvatavasti valmistatud Virumaa rauasulatuskohtades (Jegorov 2023, 57).

Nagu näha tabelist 1 on kaubaraua levinuim esinemisvorm risttahuka-kujuline, populaarsuselt teine on poolsfäärilise kujuga. Nende kahe kaubaraua kuju ja sepistamise üle arutletakse pikemalt peatükis 3.2.3.4. Kolmas erilisem, kuid samas kõige väiksema esindatusega kaubarauavorm on kera-kujuline, milliseid on leitud üksnes Alulinna linnuse lähistelt (K6).

2. Metallograafiline analüüs

Käesolev peatükk annab ülevaate Eesti muinas- ja keskaegsete rauatööpaikade toodangust ja iseloomustab rauatöö põhilist jääkprodukti – šlakki. Eraldi alapeatükkides tutvustatakse esmalt kahe keskaegse sepikoja ja kolme erineva dateeringuga rauasulatuskoha šlakke, et tuua välja nende eritunnused. Seejärel võetakse vaatluse alla kuus ebakindla liigimääranguga objekti, mis määratakse eelpool käsitletu valguses kas rauasulatuskohtadeks, sepatööpaikadeks või jäetakse teabe vähesuse tõttu määramata. Viimaks kirjeldatakse kaubatoorikute ja toorraua mikrostruktuure, et iseloomustada kohaliku rauatoodangu kvaliteeti ja vastata küsimusele, millist rauda Eestis toodeti. Kõik peatükis esitatud šlaki- ja rauaproovid on analüüsinud allakirjutanu ise, et anda neist võimalikult unikaalne ülevaade – analüüsitulemused võivad inimeseti erineda sõltuvalt uurija kogemustepagasist. Proovide nummerdus vastab TÜ arheoloogia loodusteaduslike kogude metallograafia alakogu mikrolihvide numeratsioonile.

2.1. Metoodika

Kõikide proovide ettevalmistamisel kasutati Tartu ülikooli arheoloogia labori metallograafilist aparatuuri. Ristlõiked saeti täppisae **Buehler IsoMet 4000** abil, välja valitud šlaki ja rauatükid kinnitati kruustangide vahele, saagimisel kasutati abrasiivketast. Seejärel pressiti proovid termopressi **Buehler SimpliMet XPS1** abil PhenoCure termoplastist proovihoidjatesse. Proovide lihvimine toimus **Buehler AutoMet 250** lihvpingil, kasutades selleks teemantsuspensioone (30, 9, 3 ja 1 µm terasuurusega), ning poleeriti alumiinium- ja ränioksiidi seguga (0,05 µm terasuurusega). Rauaproovide ristlõiked söövitati peale poleerimist lämmastikhappe lahuses ehk nitaalis (3% HNO₃ lahus piirituses) 6 sekundi jooksul, neutraliseeriti pesusooda lahuses (5% Na₂CO₃ lahus vees) ning loputati destilleeritud vees. Proovide ristlõikeid pildistati fotoaparaadiga **Canon EOS 760D**. Kõiki analüüsitud proove vaadeldi ja pildistati mikroskoopidega **Buehler ViewMet** ja **Olympus BX51**. Viimane tegi parema eraldusvõimega pilte ning võimaldas ristlõikepindu ka polariseeritud valguse käes vaadata. Viimase abil sai šlakiproovides vaevata eristada klaasistunud savi ja fajaliiti, mis tavalise valguse käes halli massina ühte sulanduvad. Rauaproovide mikrokõvadusi mõõdeti **Wilson Tukon 1102** mikrokõvaduse mõõtjaga. Kõik kõvadused on antud Vickersi skaalal ja mõõtmised tehti 0,1–0,5 kg raskusega 10 sekundi jooksul (edaspidi HV0.5²⁹). Kõik mõõdetud mikrokõvadused, mida pole varem publitseeritud, on koondatud lisadesse (Lisad, tabel 2).

²⁹ Vastavalt kasutatud raskusele muutub ka HV indeks. 100 grammi juures on see HV0.1, 200 grammi juures HV0.2 jne.

Ristlõigete joonised ja fotokollaažid (Lisad, fotod) pandi kokku programmis Adobe Photoshop³⁰ ning täiendati vajadusel programmis Paint 3D.

2.2. Sepikodade šlakid

2.2.1. Käku sepikoda Saaremaal (14.–17. sajand)



Joonis 4. Käku ML 157 šlakiproovi ristlõige.

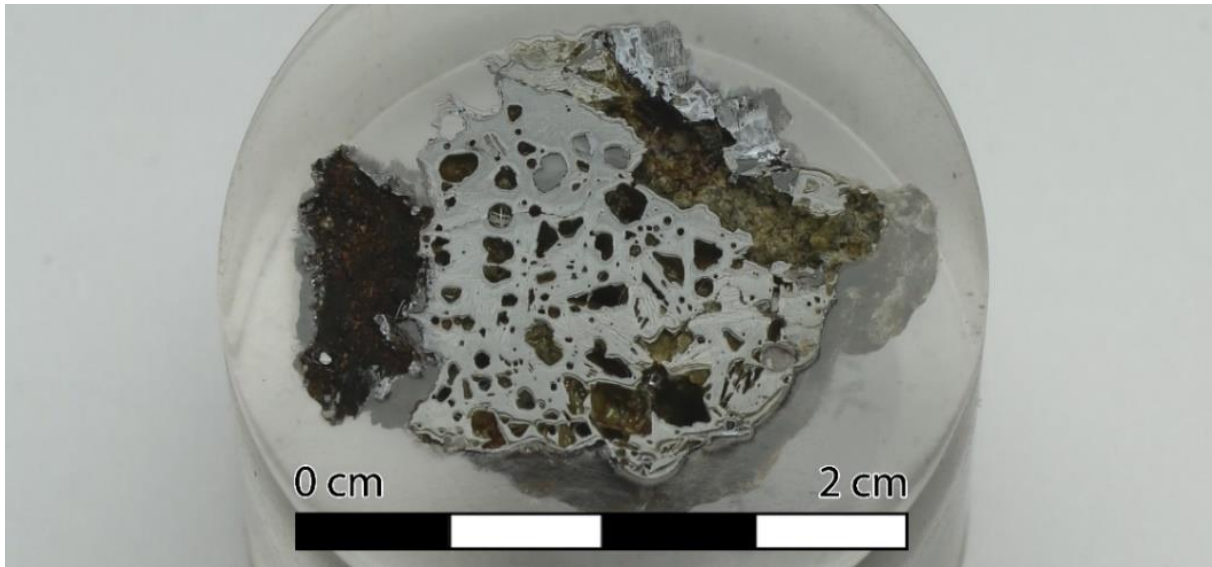
Käku **ML 157** šlakiproovi mikrostruktuuris on väga suured, sageli sirgete servadega poorid (joonis 4), mida ääristavad suured fajaliidilaastud³¹ (Lisad, foto 1: A–B). Esineb ka kontsentrilisi mulle. Fajaliit on klaasimaatriksis³² enamasti suuremate laastudena, kuid paiguti on see arenenud ka suuremateks kristallideks (foto 1: C). Teiseks eriliseks tunnuseks on vüstiidi³³ täielik puudumine, mida allakirjutanu pole varem näinud. Ferriiti leidub vähe ja vaid üksikute täppidena (foto 1: D).

³⁰ Versioon: Adobe Photoshop CS5 (64-bit)

³¹ Fajaliit ehk raudsilikaat (Fe_2SiO_4) on klaasi ja vüstiidi kõrval üks peamisi šlaki komponente.

³² Klaas ehk ränidioksiid (SiO_2) on üks kolmest šlaki põhikomponendist.

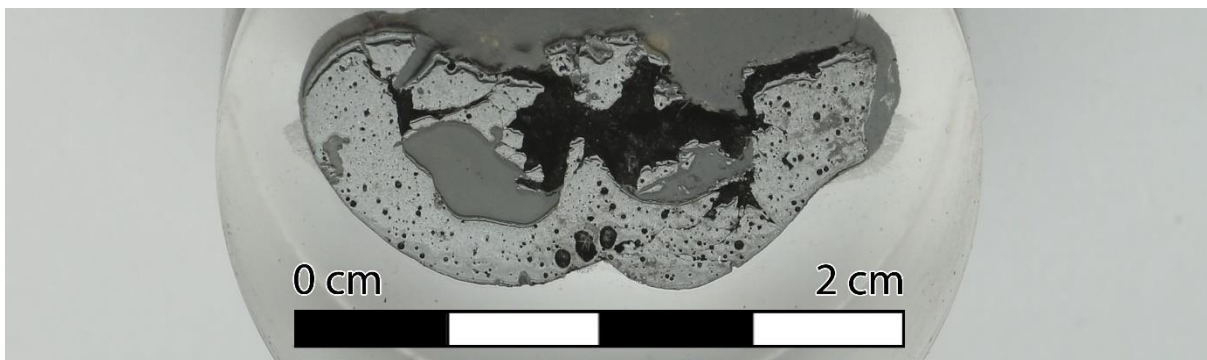
³³ vüstiit ehk raudoksiid (FeO) on üks kolmest šlaki põhikomponendist.



Joonis 5. Käku ML 159 šlakiproovi ristlõige.

Käku teine šlakiproov **ML 159** on eelmisega äravahetamiseni sarnane (joonis 5). Ka siin domineerib pikkade laastudena fajaliit (foto 2: A–B), mis näib moonutatavat pooride kuju, muutes need nurgelisteks, ja puudub vüstiit.

2.2.2. Tarvastu ordulinnuse sepikoda Viljandimaal (14.–16. sajand)



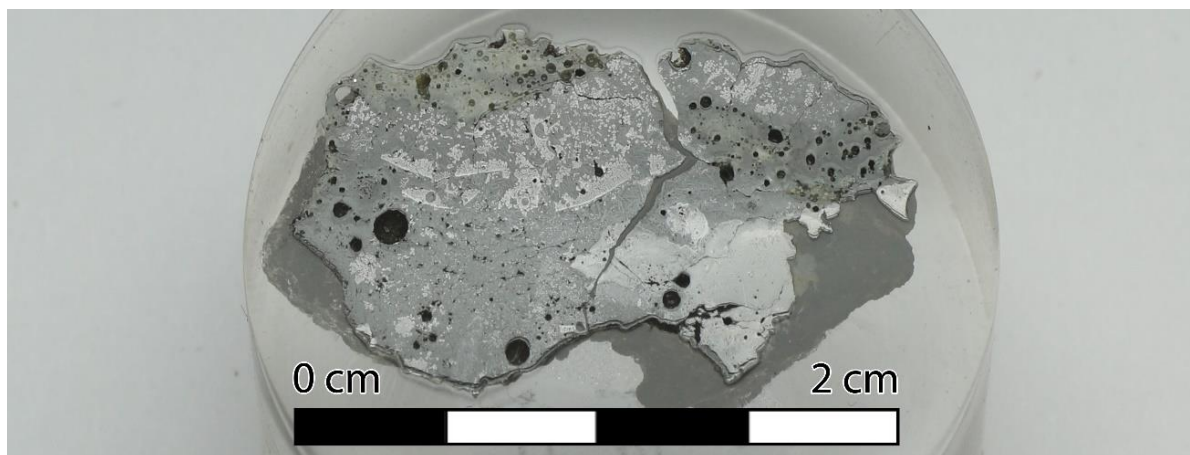
Joonis 6. Tarvastu ML 161 šlakiproovi ristlõige.

Tarvastu **ML 161**³⁴ šlakk (joonis 6) on voolamisjälgedega sepašlakk, mis sobib heaks võrdlusmaterjaliks voolanud rauasulatusšlakile. See sarnaneb Tindimurru ML 146 ja Rihula ML 109 proovidega. Šlakimaatriksis on palju poore, millest suur osa on kontsentrilised (Lisad, foto 3: A). Vüstiit on eranditult dendriitne³⁵, leidus ka üks suurem vüstiidikogum (foto 3: B),

³⁴ Kurm ja Oks, koostamisel.

³⁵ Vüstiit on šlakis moodustunud sümmeetrilisi puu-kujulisi kogumeid. Dendriidid on vüstiidi loomulik esinemisvorm. Info vüstiidi olemuse kohta pärineb allakirjutanu kirjavahetusest Freiburgi ülikooli professori Vincent Serneelsiga, kes tegeleb šlaki uurimisega.

mida võib tõlgendada osaliselt lahustunud tagilaastuna (Selskienė 2007, 27). Erinevalt Tindimurru ja Rihula proovidest on Tarvastu voolanud šlakis fajaliit läbinisti laastudena, mille suurus on vahelduv, kuid puuduvad suuremad fajaliidikristallid. Eriliseks ilminguks on šlakipesad ehk poorid, mis sisaldavad šlakki (foto 3: C). Polariseeriv valgus võimaldas šlakis tuvastada ka kvartsiterasid (foto 3: D), mis viitavad liiva kasutamisele räbustina.



Joonis 7. Tarvastu ML 162 šlakiproovi ristlõige.

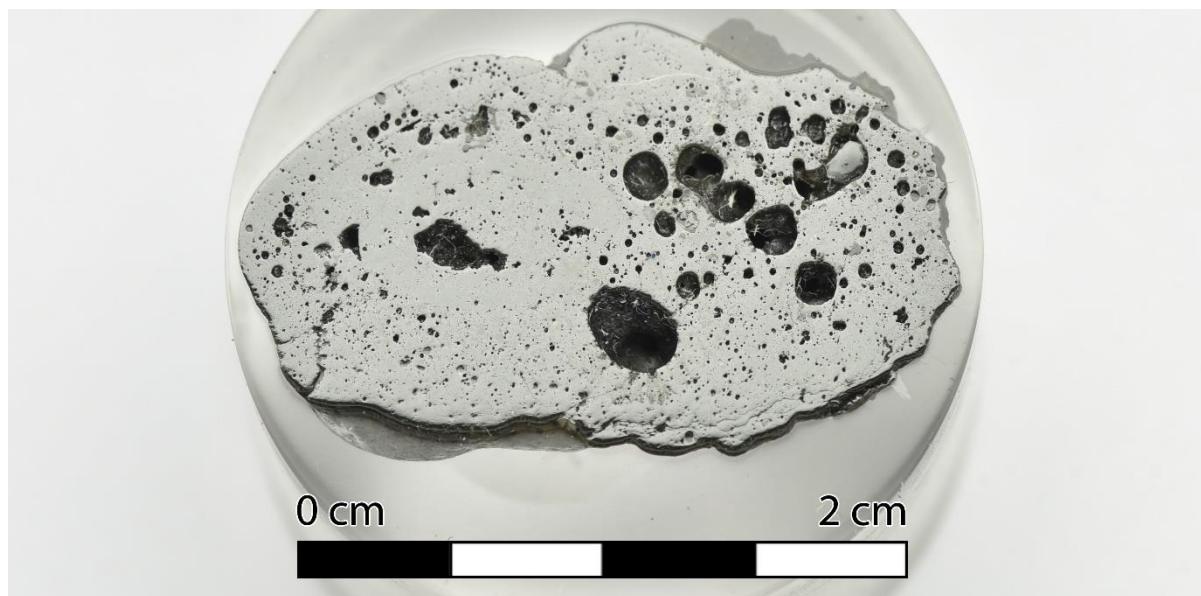
Proovi **ML 162**³⁶ (joonis 7) mikrostruktuur on väga heterogeenne. Ühes servas on lai klaasivöönd, mis on ilmselt tekkinud savist ääside sulamisel. Fajaliit esineb enamasti peenikeste laastudena, ent sageli sulandub see klaasiga ühtseks halliks massiks (Lisad, foto 4: A). Västiit on erilmeline, seda leidub proovi ühes pikiservas suure dendriitide kogumina (foto 4: B) ning proovi keskosas ühe sirge servaga saarekestena (foto 4: C). Allakirjutanu tõlgendab neid kui šlaki sisse sattunud tagilaaste, mis on hakanud kuumas šlakis ühest servast lagunema. Nende servas esineb raudoksiid magnetiidina, mille tekkimise eelduseks on rohkem oksüdeerunud keskkond, milleks sobib hästi sepaääs³⁷. Magnetiiidi põhivorm on oktaedriline, samas kui västiidi põhivorm on dendriitne. Nii on magnetiit proovis moodustanud erinevaid kujundeid, sealhulgas rombe, kolmnurki, ristikesi jm. Selliseid suuri kompaktsid västiidikogumeid on leitud ka Leedus Aukštadvarise sepašlakist (Selskienė 2007, 25, fig. 2: f), samuti esineb magnetiiti Bakšiai sepašlakis (*ibid.*, 25, fig. 3: f) Ferriiti leitud proovi servas ühe väikese kontsentrilise täpina (foto 4: D).

³⁶ Kurm ja Oks, koostamisel.

³⁷ Info magnetiidi kohta pärineb allakirjutanu kirjavahetusest prof. Vincent Serneelsiga.

2.3. Rauasulatuskohtade šlakid

2.3.1. Tindimurru rauasulatuskoht Tartumaal (1. sajand eKr – 2. sajand pKr)

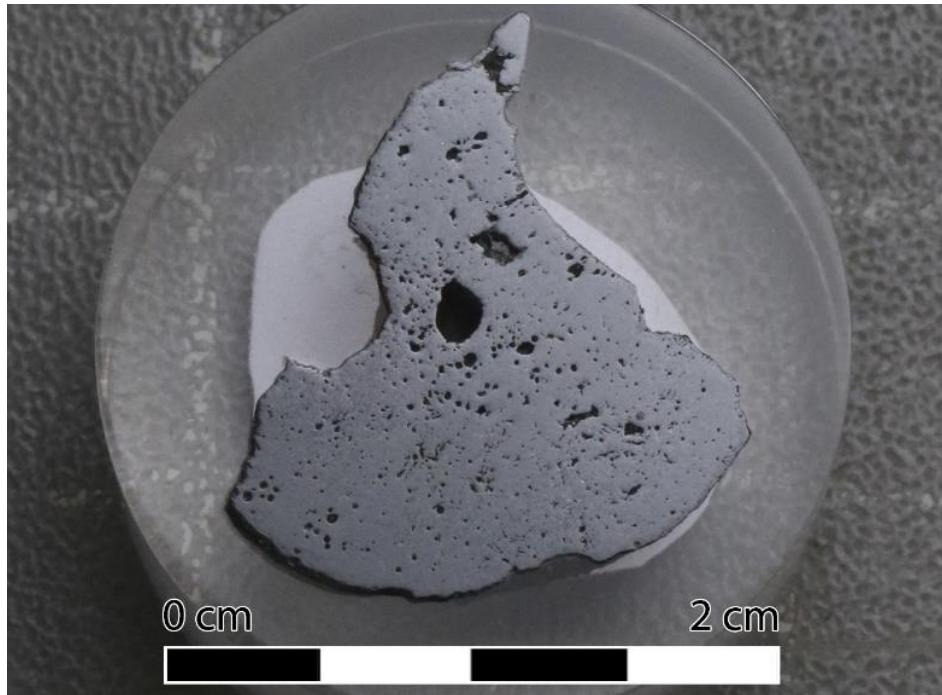


Joonis 8. Tindimurru ML 146 šlakiproovi ristlõige.

Tindimurru šlakiproov **ML 146** on voolamisjälgedega šlakitükk, mis sobis heaks näiteks ahjust välja lastud šlaki iseloomustamisel. Proov võeti šlakitüki ühest servast nii, et ristlõike pinnal kajastuks nii šlakitilga pealmine, õhu käes jahtunud külj ja alumine, maapinnal hangunud külj (joonis 8). Ristlõike servaaladel esineb fajaliit peente laastudena (Lisad, foto 5: A), kuid pilguga keskme suunas liikudes muutuvad fajaliidikristallid suuremaks (foto 5: B). Selline muutus fajaliidi kujus viitab nähtavasti šlaki ebaühtlasele jahtumisele peale ahjust välja laskmist. Maa ja õhuga kokkupuutes olev pind on jahtunud kiiremini, mille tulemuseks on nõeljad fajaliidilaastud, samas proovi keskmes on šlakk jahtunud aeglasemini, mistõttu on fajaliit suuremateks kristallideks kujunenud. Fajaliidi morfoloogia annab seega väärt teavet, kuidas ning millises keskkonnas on šlakk jahtunud. Selliseid fajaliidilaaste ja üsna homogeenset mikrostruktuuri on leitud ka Leedus Bakšiai voolanud rauasulatusšlakis (Selskienė 2007, 24, fig. 1: b). Proovi üldiseks tunnuseks on vüstiidi peaaegu et puudumine. Vüstiit esineb fajaliidiosakeste vahel enamasti väga väikeste dendriitidena (foto 5: C), kuid jääb väikese suurendusega (5x–10x) peaaegu märkamatuks. Paaris kohas esineb ka pikki vüstiidivõõndeid (foto 5: D), kuhu raudoksiid on nähtavasti ühtse kitsa kihina ladestunud. Ahjust väljalastud šlakile on omane selle poorsus ja pooride kuju. Vaadeldaval ristlõikel esinevad poorid enamasti kontsentriliste mullidena (foto 5: E), mis viitab nende tekkele väga

vedelas keskkonnas. See eeldab kõrgemaid temperatuure, mis on enamasti saavutatavad üksnes raua sulatamisel. Allakirjutanu hinnangul võiks pooride kontsentrisus ja nende ühtlane jaotumus olla üheks indikaatoriks, mis võimaldab eristada sulatus- ja sepašlakke. Paiguti on vaadeldavad ka šlaki erinevad ladestumisjärgud, mis on eraldatud tiheda pooride vööndiga ning milles fajaliit on erineva iseloomuga (foto 5: F).

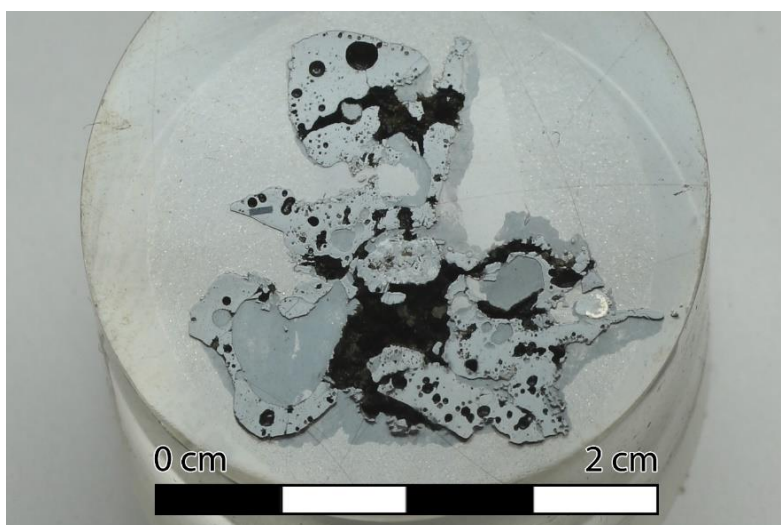
2.3.2. Rihula rauasulatuskoht Lääne-Virumaal (8.–10. sajand)



Joonis 9. Rihula ML 109 šlakiproovi ristlõige.

Rihula šlakiproov **ML 109** (joonis 9) sarnaneb väga Tindimurru prooviga ML 146. Ka siin esineb faja 6:liit servaaladel nõeljate laastudena (foto 6: A) ja keskmes suuremate kristallidena (foto 6: B). Rihula proovis esineb Tindimurrust enam vüstiiti, mis paikneb proovi pinnal ühtlaselt, kattes nii fajaliiti kui ka nende vahel asuvat klaasi. Vüstiit on sarnaselt Tindimurrule dendriitne. Samuti leidub proovi pinnal palju poore, mis on enamasti kontsentrilised.

2.3.3. Tuiu rauasulatuskoht Saaremaal (8.–15. sajand)

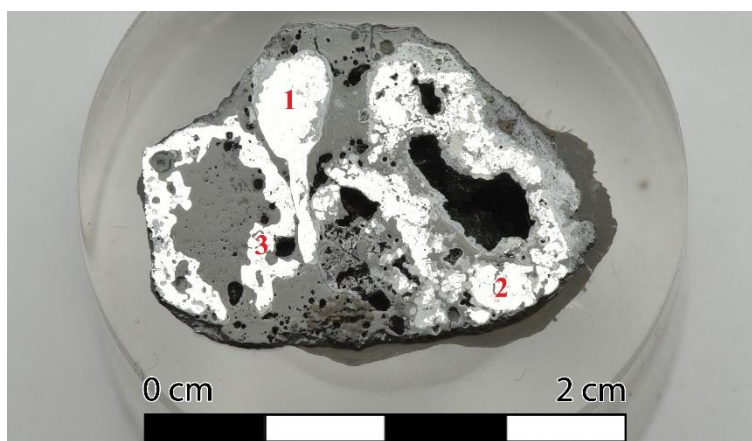


Joonis 10. Tuiu ML 111 šlakiproovi ristlõige.

Tuiu proovi **ML 111** (joonis 10) šlakimaatriksis on fajaliit valdavalt eri suuruses laastudena (Lisad, foto 7), mis on harva kujunenud suuremateks kristallideks. Västiit on dendriitne ja katab proovi pinda ühtlaselt. Poorid on eri suuruses, kontsentrilised poorid on pigem suuremad, väiksemad tühimikud jäävad fajaliidilaastude vahele ja on ebakorrapärased. Fajaliidi poolest sarnaneb Tuiu šlakk nii Tindimurru kui Rihula proovidega, västiidi poolest enam Rihulaga.

2.4. Ebakindla määranguga rauatööpaigad

2.4.1. Patjala rauatööpaik Jõgevamaal (14.–15. sajand)



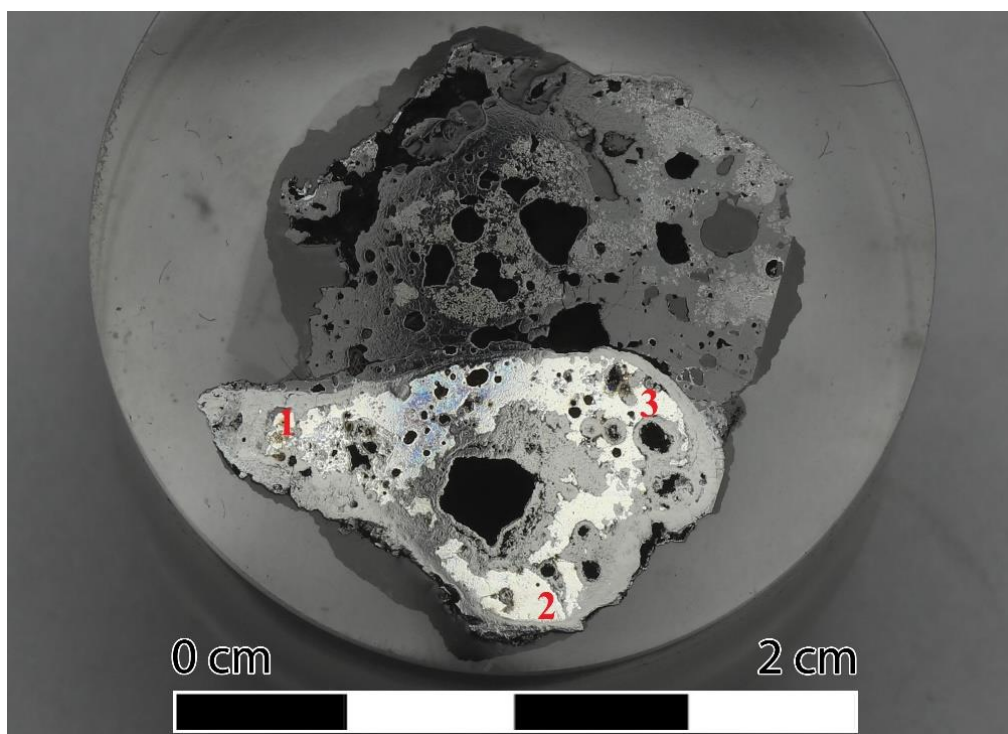
Joonis 11. Patjala ML 148 šlakiproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikroõvaduse mõõtmiskohad.

Patjala proovi **ML 148** (joonis 11) ristlõike pinnal on näha suuri poore ja šlaki sees lainetavat ferriiti. Ferriiditerad on sageli üsna suured, mis võivad viidata suuremale fosforisisaldusele (edaspidi P-sisaldus), kuna süsinikku rauas ei leidu (Lisad, foto 8: B–C). Raua mikrokõvadus jääb vahemikku 95–184 HV (Lisad, tabel 2). Ferriidikogumid on servaaladelt sageli korrodeerunud (foto 8: A), kuid korrosiooni abil on võimalik taastada rauakogumite endisaegne kuju ja mõõtmed. Nii on näha, et ferriit esineb šlakis lainjate ja sujuvate servadega kogumitena (foto 8: D). Ferriidi esinemine sellisel kujul viitab moodustumisele kõrgematel temperatuuridel pehmemas olekus kui on raud sepäääsis. Šlaki mikrostruktuur sarnaneb Tindimurru voolanud šlakiga: fajaliit domineerib ja see esineb enamasti nõeljate laastudena (foto 8: E). Fajaliidiklaasi maatriksis on ka vüstiit, kuid see esineb pea eranditult väga väikeste dendriitidena, kusjuures ka siin on näha selliseid vüstiidivõid nagu Tindimurru proovis ML 146 (foto 8: F). Šlakisegus on ka poore, mis on sageli kontsentrilised.

Võttes arvesse Patjala šlaki sarnasusi Tindimurru šlakiga, ristlõike suurt poorsust ning ferriidikogumite lainjat kuju, tundub, et Patjala objekti puhul on tegu rauasulatuskohaga. Šlakitüki pealt võetud puusöe radiosüsiniku analüüs dateeris selle 14.–15. sajandisse³⁸ – perioodi, mil kohalik rauatootmine hakkas järk-järgult lõppema ja kasutusele tuli Rootsi importraud osmund. Patjala raud on oma suurte pooride ja šlakisisalduse poolest siiski sarnasem kohaliku toodanguga, mitte importrauaga.

³⁸ Poz-189815, 550±30 BP, 1318–1360 AD, 1388–1434 AD cal. 95,4%.

2.4.2. Kõpu rauatööpaik Hiiumaal (10.–12. sajand)

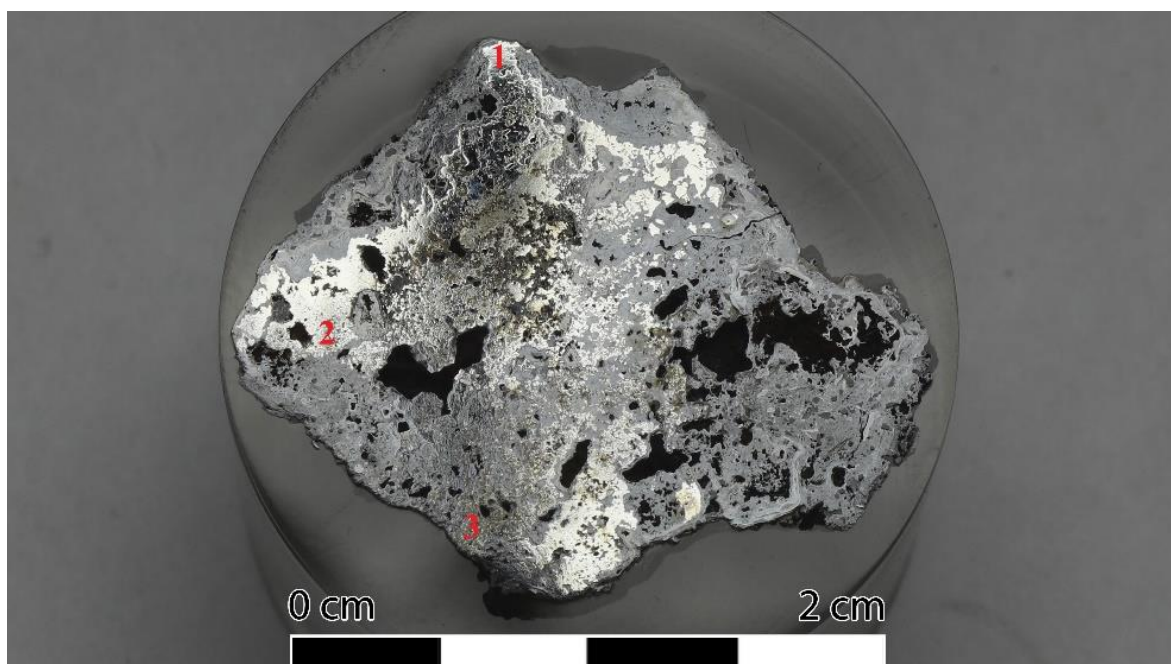


Joonis 12. Kõpu ML 134 šlakiproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Kõpu šlakiproovi **ML 134** ristlõige on tugevalt korrodeerunud ja poorne (joonis 12). Pooride kuju ja suurus on varieeruvad. Proov sisaldab palju malmi, mis esineb nii perliidi ja ledebüriidina³⁹ (Lisad, foto 9: A), sisaldades ka grafiidiliblesid (foto 9: B). Malmi mikrokõvadus jääb vahemikku 430–593 HV (Lisad, tabel 2). Šlakis on fajaliit enamasti laastudena (foto 9: C), vüstiit esineb nii dendriitidena kui ka korratute kujudena (foto 9: D), samas on ka suuri alasid, kus vüstiiti ei leidu. Analüüsitud malmitükist tehti radiosüsiniku dateering, mis ajaldas selle 10.–12. sajandisse⁴⁰. Arvestades malmitüki dateeringut ja proovi ristlõike sarnasust peatükkides 2.5. ja 2.6. analüüsitud kohaliku rauatoodanguga määrab allakirjutanu ka selle leiu kohaliku toodangu sekka.

³⁹ Ledebüriit on eutektoidsetel temperatuuridel moodustuv struktuur valgemalmis. Valgemalmis esineb süsinik tsementiidina (Fe₃C). (Peets 2003, 140–141)

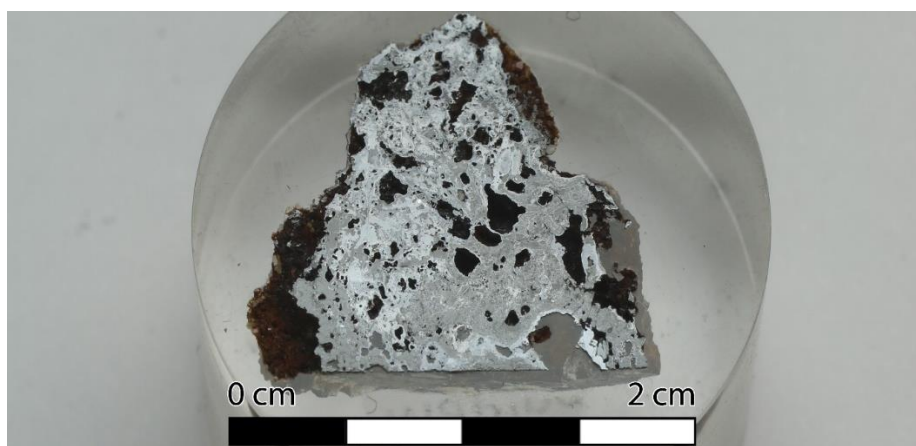
⁴⁰ Ua-86019, 1008±49 BP, 973–1161 AD cal. 95,4%.



Joonis 13. Kõpu ML 135 šlakiproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Kõpu teise proovi **ML 135** ristlõige on väga poorne, korrodeerunud, šlakine ja sisaldab ka palju klaasi (joonis 13; Lisad, foto 10: D). Västiit on dendriitne ja fajaliit selle taustal on ühtlane. Proovi servaaladel on süsinikuvaba raud (foto 10: A), mille mikrokõvadus jääb vahemikku 135–150 HV (Lisad, tabel 2). C-sisaldus kasvab proovi keskme suunas (foto 10: B). Keskel on perliitne teras (foto 10: C) mikrokõvadusega 244–268 HV. Paiguti leidub šlaki ja ferriidisegust struktuuri (foto 10: F) Šlaki sees on tagilaaste ja üks ümar tagikuul, mis viitavad sepistamisele (foto 10: E). On väga võimalik, et selle proovi näol on tegemist sepašlakiga. Kuna proovis sisaldub ka terast, oleks võimalik see radiosüsiniku meetodil ära dateerida. Mõlema proovi makrostruktuuri heterogeensuse põhjal näib allakirjutanule, et Kõpu puhul on tegu rauasulatuskohaga, kus on viikingi- ja hilisrauaajal valmistatud kõrge C-sisaldusega rauda, mis mõnel puhul on lausa malmiks sulanud. Proov ML 135 tõendab ka kohapeal toimunud sepatööd, mida on toorraua esmase sepistamise näol tehtud igas sulatuskohas.

2.4.3. Mägipe rauatööpaik Hiiumaal

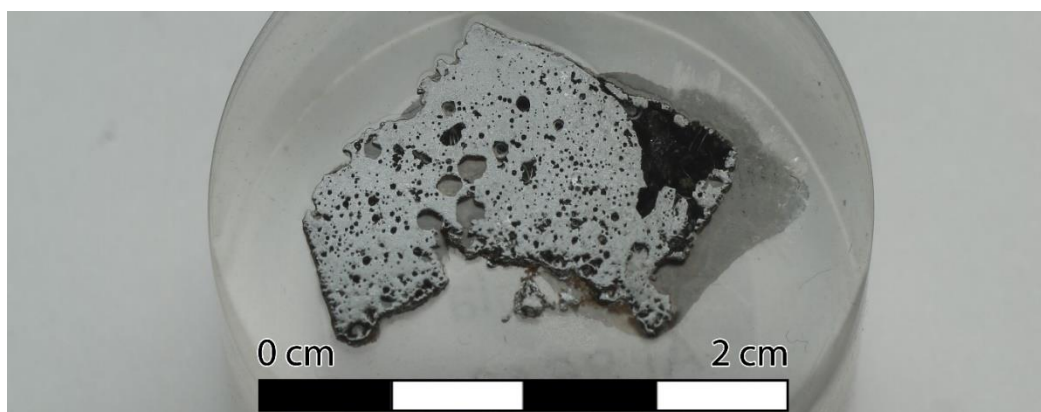


Joonis 14. Mägipe ML 133 šlakiproovi ristlõige.

Mägipe **ML 133** proovi ristlõike pind oli väga poorne, tugevalt korrodeerunud ja šlakirohke, sisaldades palju ka klaasistunud savi (joonis 14). Poorid on suured ja enamasti korratu kujuga, kuid leidub ka kontsentrilisi mulle (Lisad, foto 11: A). Korrosiooni rohke esinemine ristlõike servaaladel ja sees viitab, et tegu on olnud suure rauasisaldusega šlakiga, milles raud on ära roostetanud. Leidub pisemaid ferriidikogumeid (foto 11: B). Sarnaselt Patjala proovile ML 148 on ka siin korrosioon sageli laineline. Ferriit on süsinikuvaba pehme raud mikrokõvadusega 100 HV (Lisad, tabel 2). Šlakimaatriksis esineb vüstiit enamasti dendriitidena, kuid leidub ka üksikuid korratu kujuga kogumeid (foto 11: C). Üldiselt on vüstiiti vähe ja nähtavad dendriitide kogumid paiknevad eraldi saarekestena. Fajaliit nende taustal on enamasti ühtlane, kuid leidub üksikuid suuremate laastudega piirkondi, mis võivad ka suuremateks kristallideks areneda (foto 11: D).

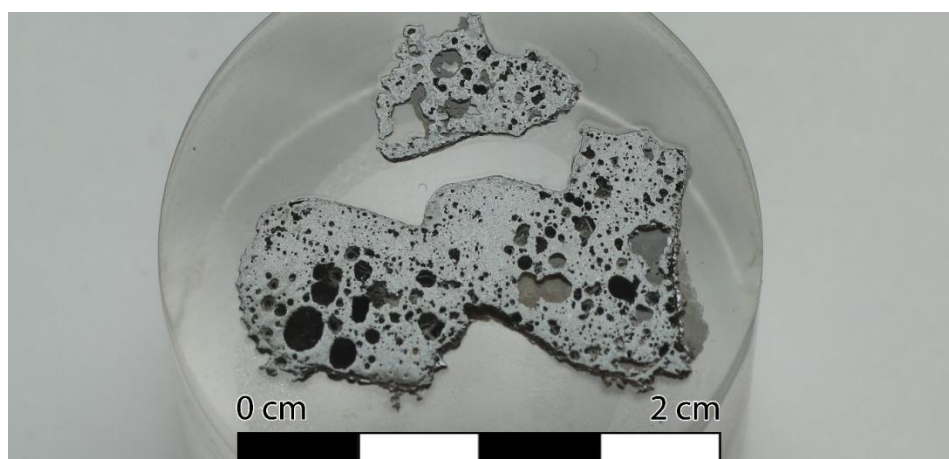
Eelpooltoodut arvestades on Mägipe proovi puhul tegu rauatööjäägiga, mis sisaldab nii šlakki, klaasistunud savi kui ka rauda, viimast nii metallilisel kui ka oksüdeerunud kujul. Et fajaliit esineb enamasti suuremate kristallidena ja vüstiit dendriitidena, on šlakitükk jahtunud pigem aeglaselt, võimalik, et ahjus. Kuna proov sisaldab lisaks ka rauda ja ümmargusi poore, mis sarnanevad väga teiste rauasulatusšlakkidega, näib ka Mägipe puhul olevat tegu rauasulatuskohaga, mis vajaks täiendavaid uuringuid ja analüüse.

2.4.4. Toila rauatööpaik Ida-Virumaal (4.–2. sajand eKr)



Joonis 15. Toila ML 143 šlakiproovi ristlõige.

Toila proovi **ML 143** mikrostruktuur on väga poorne ja need on valdavalt kontsentrilised, kuid esineb ka suuremaid ja korrapäratu kujuga tühimikke (joonis 15; Lisad, foto 12: A–B). Västiiti leidub peenikeste dendriitidena, kuid paiguti moodustab see suuremaid kogumeid, mis pole saanud dendriitideks areneda (foto 12: B). Fajaliidi laastud on väga laiad ja klaasi osakaal nende vahel on väike (foto 12: C). Paiguti on fajaliit arenenud suuremateks kristallideks. Metallilist rauda on näha vaid üksikute täppidena (foto 12: D), kuid paigutised korrosiooniilmingud annavad aimu selle kunagisest rohkusest. Arvestades västiidi ja fajaliidi ja västiidi iseloomu on šlakk jahtunud pigem aeglaselt kas siis ahjus või ääsis.



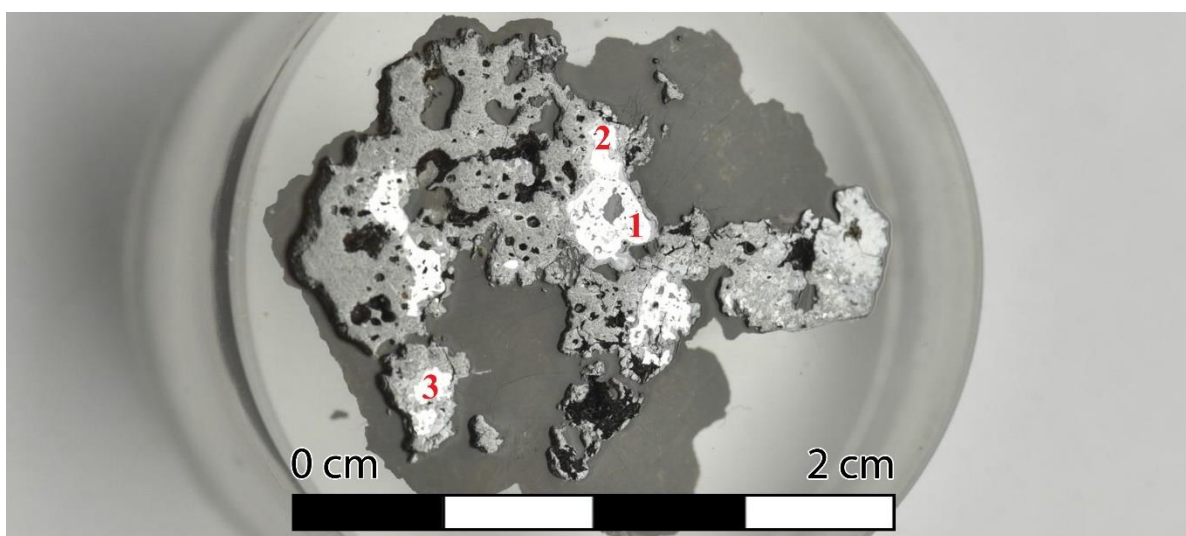
Joonis 16. Toila ML 144 šlakiproovi ristlõige.

Teine Toila šlakiproov **ML 144** on sarnane esimesega (joonis 16). Mikrostruktuur on poorne, enamasti on mullid kontsentrilised (Lisad, foto 13: A). Palju on üsna kitsast dendriitset västiiti (foto 13: B) ja samas laiud fajaliidilaaste. Erinevuseks on suuremate västiidikogumite

puudumine. Fajaliit on paiguti väga laiali laotatud ja sageli pole selles maatriksis ei vüstiiti ega ka klaasi (foto 13: C). Proovi servaalal on näha šlaki kahte ladestumisjärku, mis on üksteisest eraldatud tiheda pooridereaga (foto 13: D).

Mõlemad proovid sarnanevad pooride kuju poolest väga tugevalt Tindimurru ML 146 ja Rihula ML 109 proovidega. Suuremaks erisuseks on siiski fajaliidi iseloom, kuna Tindimurru ja Rihula voolanud šlakkides esines palju nõeljaid fajaliidilaaste. Toila proovides on fajaliit aga ühtlane ja väga harva laastudena. On kindel, et Toila rauatööpaigas on tegeletud raua sepistamisega, mille tunnistajateks on kultuurkihis leitud tagilaastud ja -kuulid (Kriiska *et al.* ilmumas). Kuigi šlakk meenutab mikrostruktuuri poolest tugevalt sulatusšlakki, jätab allakirjutanu hetkel kõnealuse muistise liigi määramata. Tegu võib olla Eesti seni vanima raua tootmiskohaga, mille tõestamiseks on vaja rohkem tõendeid nagu näiteks rauamaaki või savist ahjukatkeid (*ibid.*).

2.4.5. Lalli rauatööpaik Tartumaal

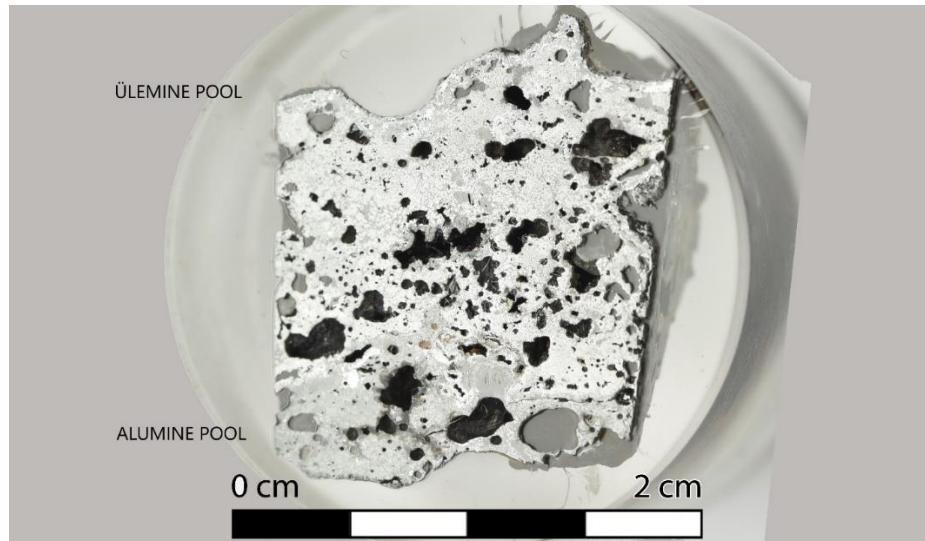


Joonis 17. Lalli ML 151 šlakiproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Lalli šlakiproovi **ML 151** mikrostruktuur on väga poorne, poorid on varieeruva suuruse ja kujuga (joonis 17). Proovis on palju rauda, mis esineb kohati nii puhta ferriidina (Lisad, foto 14: A) kui ka kõrgema C-sisaldusega perliidina (216 HV) (foto 14: B; Lisad, tabel 2). Seejuures esineb nii perliidi ja ferriidi segu, kus perliidis esinevad nurgelised ferriiditerad (148 HV) (foto 14: A ja C). Üldiselt on terast rohkem kui süsinikuvaba rauda. Šlaki puhul esineb fajaliit enamasti suuremate nurgeliste kristallidena (foto 14: D), kuid servaaladel leidub paiguti ka

laastusid (foto 14: E–F). Västiit esineb pea eranditult dendriitidena. Allakirjutanu hinnangul võiks Lalli puhul tegu olla rauasulatuskohaga.

2.4.6. Patküla rauatööpaik Valgamaal

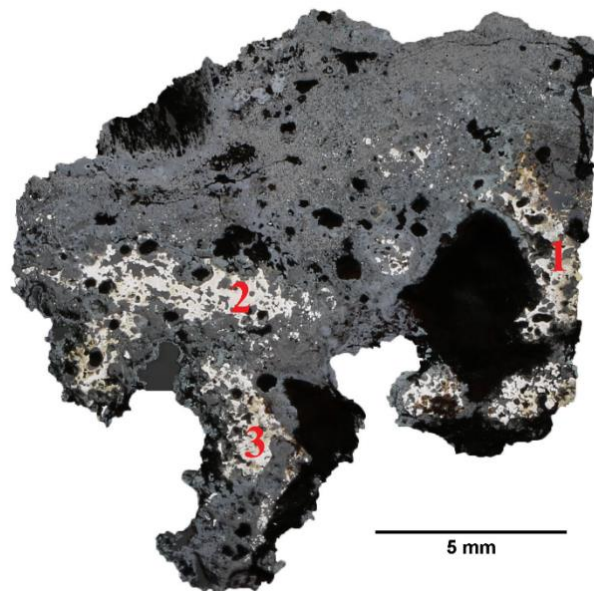


Joonis 18. Patküla ML 150 šlakiproovi ristlõige.

Patküla **ML 150** proov võeti šlakipätsi ühest servast, et saada hea ristlõige, mis iseloomustaks nii pätsi alumist, keskmist kui ka pealmist osa. Esimene seib saeti omakorda kolmeks, millest keskmine tükk sobis analüüsiks kõige paremini. Proovi ristlõige on väga poorne (joonis 18), poorid on ebakorrapärased. Proovi alumises osas on pikad fajaliidilaastud, mis meenutavad tugevalt Käku šlakiproovides ML 157 ja ML 159 nähtut, västiidi osakaal on pigem tagasihoidlik ning see on dendriitne (Lisad, foto 15: A). Esineb muutliku kuju ja suurusega ferriiti ning korrosiooni (foto 15: B). Poorsus suureneb proovi keskosas, sageli on pooride servad korrodeerunud. Umbes ristlõike keskosas muutub västiit järsku suuremaks, see esineb ümarate kogumitena ja on ka üksikuid pikemaid dendriite (foto 15: C). Fajaliit esineb suuremate kristallidena, mitte laastudena nagu proovi alaosas (foto 15: D). See muutus fajaliidi iseloomus tuli kohe, kui västiit suuremaks ja ümaraks muutus. Ristlõike ülaosas on västiit pisut väiksem kui keskosas, kuid esineb taas pigem dendriitidena, kuigi need kalduvad laiali valguma. On ka üksikuid ümaramaid västiidikogumeid. Fajaliit on maatriksis hajunud ja on väga keeruline teha vahet fajaliidi ja klaasi vahel (foto 15: E). Kuigi fajaliidi poolest sarnaneb Patküla šlakk väga Käku šlakiga, ei täheldatud proovis teisi sepašlaki tunnuseid nagu tagilibleid- ja kuulid ning kvartsiterad, mistõttu ei ole hetkel alust Patküla objekti kindlaks sepikojaks või määrata. Seega jääb objekt hetkel täpsemalt määratlemata.

2.5. Kaubaraua analüüs

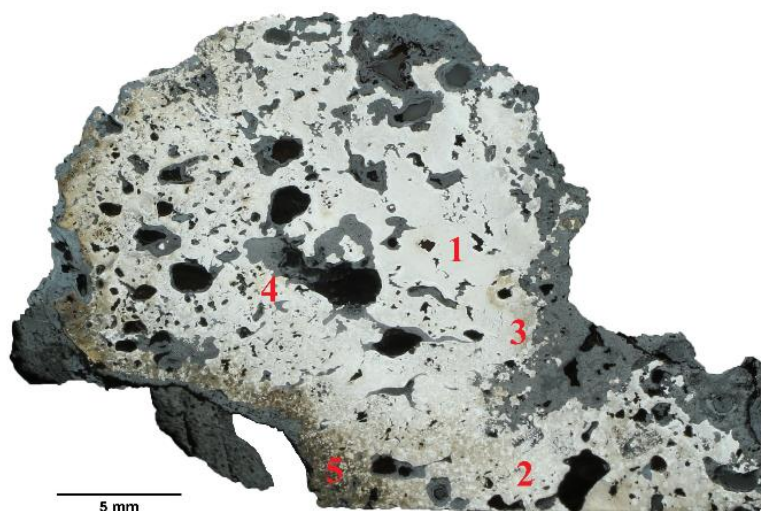
2.5.1. Aa küla kaubaraud



Joonis 19. Aa ML 27 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Aa küla kaubaraua **ML 27** ristlõike makrostruktuur on valdavalt korrodeerunud ja väga poorne (joonis 19), poorid on varieeruva suurusega. Kuna rauda esineb ristlõike pinnal vähe, suudeti eristada vaid kolm eriilmelist piirkonda. Struktuur 1 (Lisad, foto 16: A) on süsinikuvaba ferriit, mille mikrokõvadus 191–248 HV (Lisad, tabel 2) viitab raua suurele P-sisaldusele, mis teeb raua kõvaks ja rabedaks (vt peatükk 4.2.). Ka struktuurid 2 (foto 16: B) ja 3 (foto 16: C) on süsinikuvaba ferriit, mille P-sisaldused on on välja toodud peatükis 4.2.

2.5.2. Alulinna kaubaraud

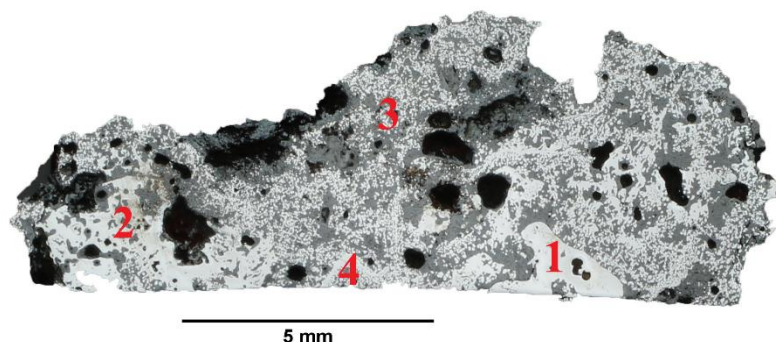


Joonis 20. Alulinna ML 15 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Alulinna rauatooriku **ML 15** makrostruktuur on väga poorne (joonis 20), korrodeerunud ja šlakirohke, poorid on erinevas mõõdus ja korrapäratu kujuga. Ristlõike pinnal eristati kokku viis erilmelist piirkonda. Struktuur 1 (Lisad, foto 17: A) on keskmise terasuurusega ferriit keskmise mikrokõvadusega 168 HV (Lisad, tabel 2). Struktuur 2 (foto 17: B) on Widmanstätteni ferriit⁴¹, mille C-sisaldus on alla 0,3% (166 HV). Struktuur 3 (foto 17: C) on martensiit, mille mikrokõvadus oli eelnevatest üksjagu suurem – 145–275 HV. Struktuur 4 (foto 17: D) on pehme ferriit (keskmiselt 128 HV). Struktuur 5 (foto 17: E) on termotöödeldud ja see oli kõnealuse proovi kõige suurema kõvadusega ala – 314–342 HV. Šlakis on fajaliit ühtlane ning vüstiit esineb dendriitidena, on märgata kontsentrilisi mulle (foto 17: F). Kokkuvõtvalt on tegu varieeruva C-sisaldusega rauaga.

⁴¹ Widmanstätteni struktuuriks/ferriidiks nimetatakse madala süsinikusisaldusega (<0,3%) ferriidi-perliidi struktuuri, mis tekib terase ülekuumutamisel ja järsul jahutamisel (Peets 2003, 140).

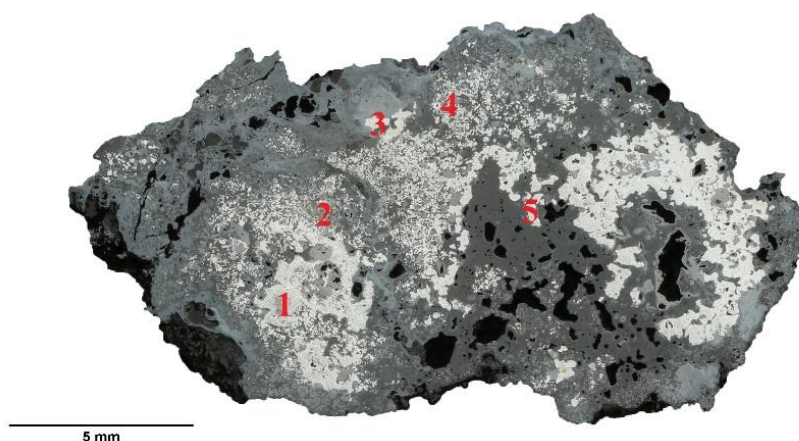
2.5.3. Varja kaubaraud



Joonis 21. Varja ML 28 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Varja **ML 28** rauatooriku ristlõike pind on poorne (joonis 21), šlaki ja rauasegune ning paiguti esineb korrosiooni. Ferriit esineb šlakis nii suuremate kogumitena (Lisad, foto 18: A–B) kui ka väiksemate osakestena, mis on jäänud suuremaks rauakogumiks ühinemata (foto 18: C–D). Proovi mikrokõvadusi mõõdeti viiest eri piirkonnast ja kõikide tulemused viitavad, et tegu on pehme rauaga – 99–123 HV (Lisad, tabel 2). Varja kaubatoorikutest on siiski ka kõrgema C-sisaldusega terast leitud, mille radiosüsiniku analüüs võimaldas terve kogumi dateerida 11.–13. sajandisse (Jegorov 2023, 26). Šlakk on sarnane Alulinna ML 15 proovile: fajaliit on ühtlane ja vüstiit on dendriitne (foto 18: E–F).

2.5.4. Metsamägara kaubaraud

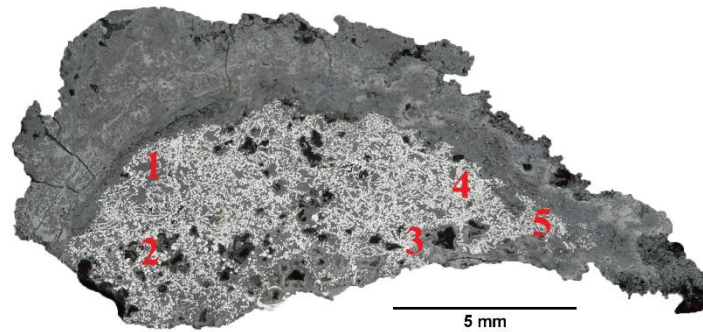


Joonis 22. Metsamägara ML 7 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Metsamägara **ML 7** rauatooriku makrostruktuur oli väga poorne, tugevalt korrodeerunud ja šlakirohke (joonis 22). Raua mikrostruktuuris eristati kokku viis eriilmelist piirkonda. Enamasti oli ristlõike pinnal näha ferriidi-perliidi maatriksit mikrokõvadusega 93–137

HV(Lisad, foto 19: C, E; Lisad, tabel 2), kuid esines ka mõnevõrra kõvemat Widmanstätteni ferriiti (117–147 HV) (foto 19: A) ja üleeutektoidset terast⁴² (197–264 HV) (foto 19: B). Šlakk on heterogeenne, paiguti on fajaliit väikeste laastudena ja vüstiit puudub (foto 19: C, E), paiguti on fajaliit ühtlane ja vüstiit moodustab suuri dendriite (foto 19: F).

2.5.5. Praaga kaubaraud

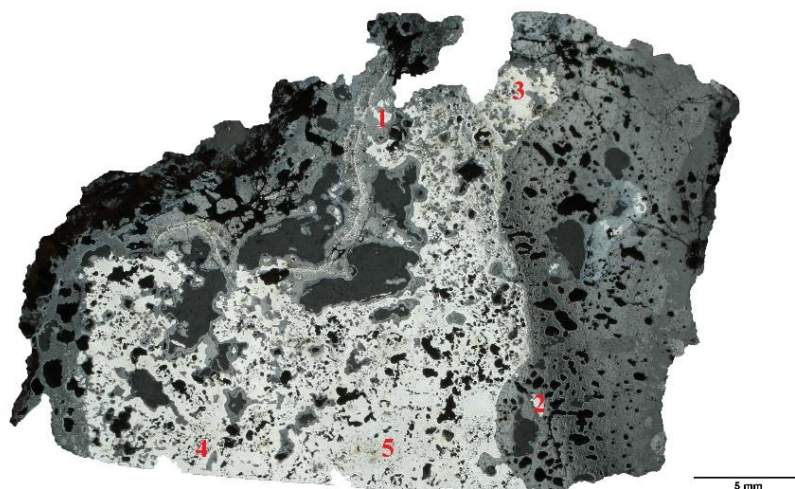


Joonis 23. Praaga ML 19 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Praaga **ML 19** proovi servaala on tugevalt roostes, üldine makrostruktuur on poorne ja ferriidi-šlakisegune (joonis 23). Mikrostruktuur on küllaltki homogeenne, ferriit on šlakis moodustanud lainjaid ja ümaraid kogumeid, mille suurus on muutlik (Lisad, foto 20: A–E). Tegemist on pehme rauaga, mille mikrokõvadus jääb vahemikku 73–130 HV (Lisad, tabel 2).

⁴² Üleeutektoidne teras (*hypereutectoid steel*) on terasevorm, mis sisaldab rohkem kui 0,8% süsinikku. (Peets 2003, 140)

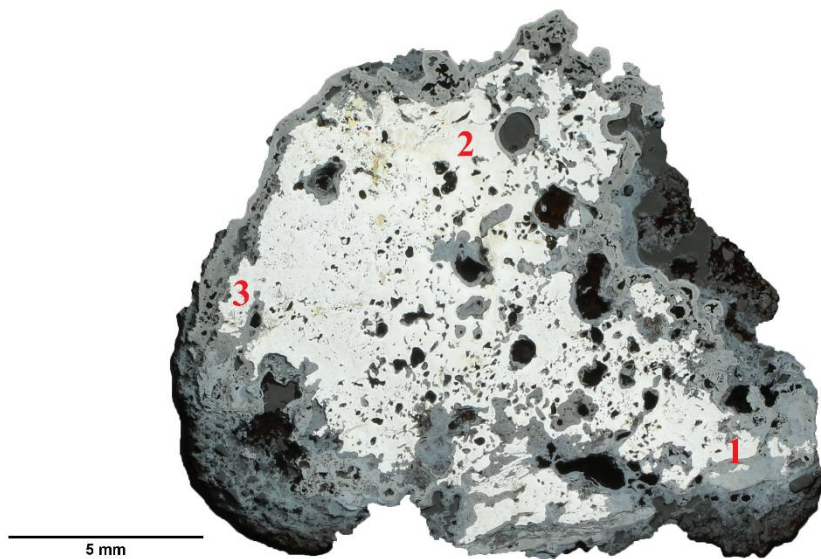
2.5.6. Ollepa kaubaraud



Joonis 24. Ollepa ML 25 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Ollepa ML 25 kaubatooriku ristlõike servaalad on väga korrodeerunud (joonis 24). Makrostruktuur on väga poorne ja nende parameetrid varieeruvad suuresti. Mikrostruktuuris eristati viis eriilmelist ala. Valdavalt oli tegu pehm ferriidiga, mille terade vahel esines erineval määral perliiti (Lisad, foto 21: A–D). Mikrokõvadus nendel aladel jäi vahemikku 72–108 HV (Lisad, tabel 2). Struktuur 5 on seevastu Widmanstätteni ferriit (foto 21: E), mille mikrokõvadus 105–133 HV oli ühtlasi proovi suurim. Šlakis on esindatud kitsad fajaliidilaastud ja dendriitne vüstiit (foto 21: F). Üldiselt on aga tegu pehme rauaga.

2.5.7. Sürgavere kaubaraud

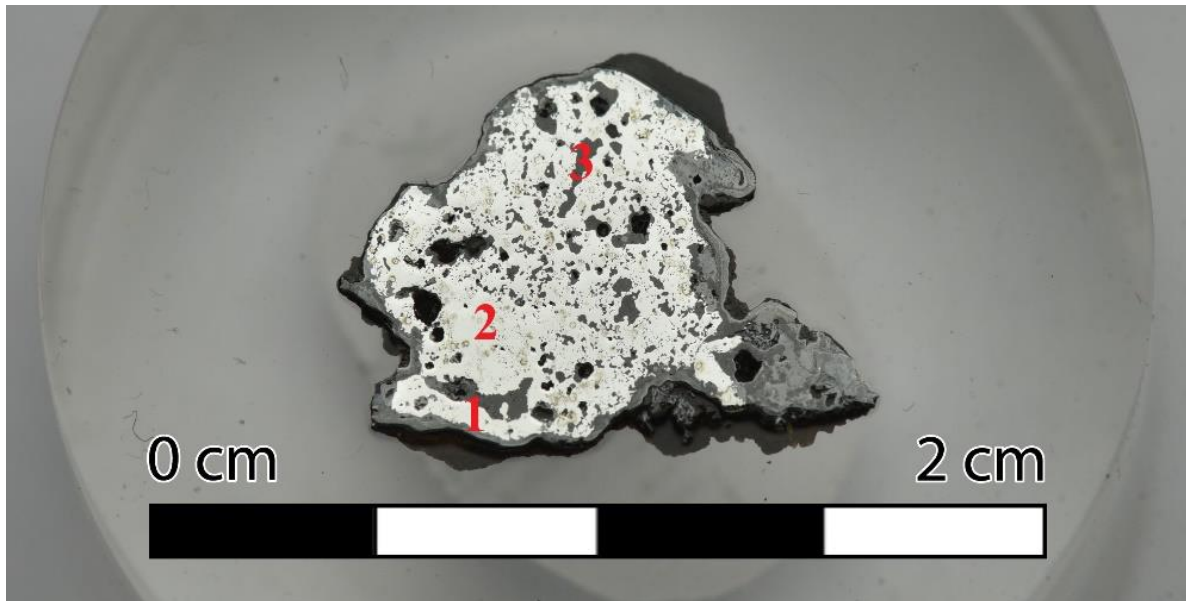


Joonis 25. Sürgavere ML 31 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Sürgavere **ML 31** rauaproovi pind on poorne, šlakirohke ja korrodeerunud (joonis 25). Raud on enamasti pehme ferriit mikrokõvadusega 68–92 HV (Lisad, foto 22: A–C; tabel 2), struktuuris 1 tuvastati ka perliiti (foto 22: A), mis viitab kergele C-sisaldusele. Mikrokõvadus sellises alas oli 91–99 HV. Üldiselt on Sürgavere proovi näol tegemist pehme rauaga.

2.6. Toorraua analüüs

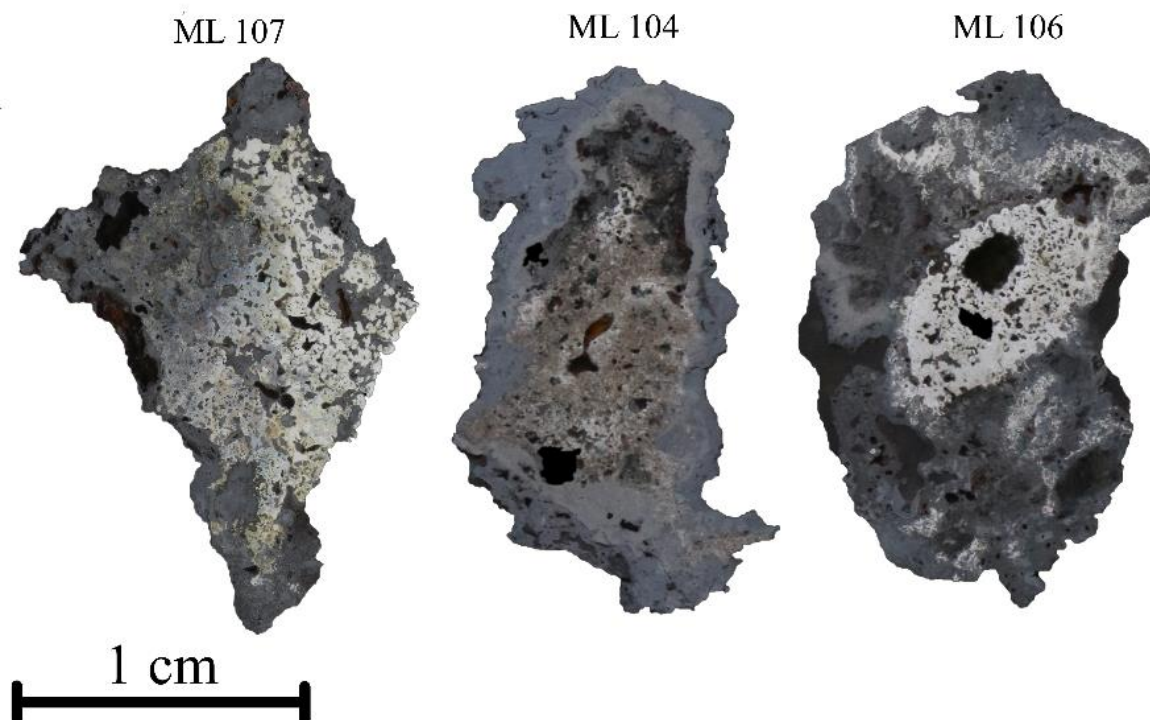
2.6.1. Tindimurru toorraud (1. sajand eKr – 2. sajand pKr)



Joonis 26. Tindimurru ML 147 rauaproovi ristlõige. Numbritega on märgitud mikrokõvaduse mõõtmiskohad.

Tindimurru **ML 147** toorraua ristlõige on poorne, šlakine ja korrodeerunud (joonis 26). Raud on süsinikuvaba (Lisad, foto 23: A–C), kuid selle mikrokõvadus jääb vahemikku 104–278 HV (Lisad, tabel 2), mis viitab raua P-sisaldusele (vt peatükk 4.2.). Šlakis esineb fajaliit paiguti suuremate kristallidena (foto 23: A) koos dendriitse vüstiidiga, paiguti aga laastudena, kus pole vüstiiti märgata (foto 25: C).

2.6.2. Rihula toorrauad (8.–10. sajand)



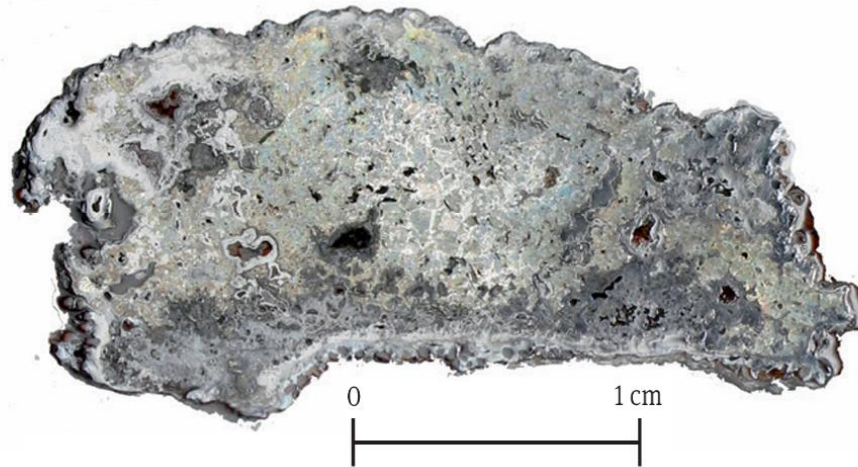
Joonis 27. Rihula ML 104, 106 ja 107 rauaproovide ristlõiked.

Rihula rauasulatuskohast leitud toorrauatükke **ML 104** (end. L17), **106** (L4) ja **107** (37) (joonis 27) on allakirjutanu analüüsinud juba varem ning tulemused on publitseeritud *Arheoloogilised välitööd Eestis 2022* kogumikus (Jegorov *et al.* 2023, 111–112). Proovi **ML 104** mikrostruktuuris esines eutektoidset⁴³ ja üleutektoidset terast (Lisad, foto 24: C–D), mille C-sisaldus on üle 0,8%. Proov **ML 106** oli servaaladel pehmem raud (94–96 HV) (foto 24: A), proovi keskosas oli Widmanstätteni struktuur (125–208 HV) (foto 24: B). Proov **ML 107** sisaldas nii fosforit (foto 24: E) kui ka süsinikku (foto 24: F). Süsinikusisaldus jääb alla 0,8% ja seda nimetatakse alaeutektoidseks⁴⁴ teraseks. P-sisaldusega alade mikrokõvadus jäi vahemikku 229–306 HV ja selle põhjal arvatud P-sisaldus ulatus 0,85–1,75%-ni. (Jegorov *et al.* 2023, 111–112)

⁴³ Eutektoidne teras (*eutectoid steel*) on terasevorm, mis sisaldab 0,8% süsinikku. (Peets 2003, 140)

⁴⁴ Alaeutektoidne teras (*hypoeutectoid steel*) on terasevorm, mis sisaldab vähem kui 0,8% süsinikku. (*ibid.*)

2.6.3. Tuiu toorraud (13.–14. sajand)



Joonis 28. Tuiu ML 110 rauaproovi ristlõige.

Tuiu rauasulatuskohast 2022. aasta välitöödel leitud toorrauda **ML 110** on allkirjutanu analüüsinud juba varem ning tulemused on publitseeritud *Arheoloogilised välitööd Eestis 2022* kogumikus (Unt *et al.* 2023). Lühidalt öeldes on tegu enamasti eutektoidse (Lisad, foto 25: A) või üleutektoidse terasega (foto 25: B–C), mille C-sisaldus on suurem kui 0,8%. Proovi mikrokõvadus jääb vahemikku 169–228 HV (*ibid.*, 102). Terasest tehtud radiosüsiniku analüüs dateerus 13.–14. sajandisse⁴⁵.

⁴⁵ Ua-78721, 658±32 BP, 1279–1326 AD, 1351–1394 AD cal. 95,4% (vt ka Unt *et al.* 2023, 103)

3. Rauasulatusprotsess: arheoloogia ja katsed

Arheoloogiline leiuvaine ja selle tõlgendamine üksi ei võimalda vastata kõigile küsimustele, mis muistse metallurgia uurimisel püstitatakse. Erinevate metallitöö protsesside paremaks mõistmiseks on kõige kasulikum uurijail endil need töövõtted ja –etapid läbi teha ehk võtta appi eksperimentaararheoloogia. Rauasulatuskatseid on Eestis tehtud juba alates 1978. aastast ning erineva edukusega korraldatakse neid siiani. Tinglikult võib selle 47 aasta pikkuse aegrea jagada kolme suuremasse *faasi*, mida iseloomustavad erinevad tegutsemismotiivid ja uurimisküsimused. Järgnevalt kirjeldatakse kõiki kolme faasi, tuuakse välja nende eripärad, uurimisküsimused ja –motiivid, ning arutletakse eksperimentide tulemuste üle.

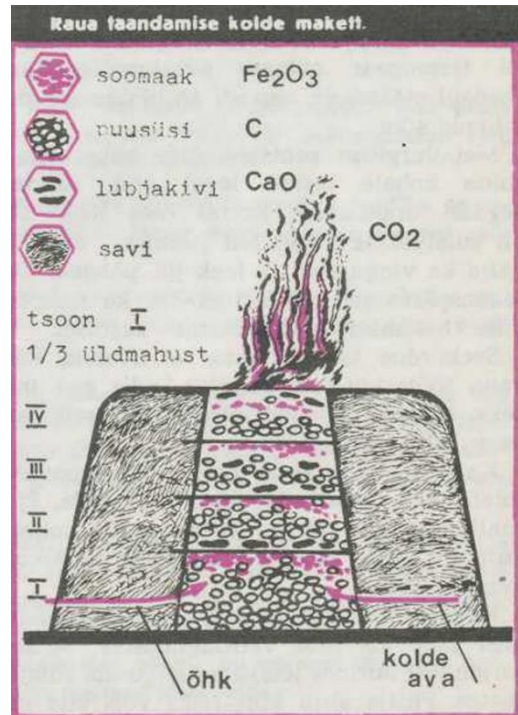
Olgu öeldud, et esimese ja teise faasi eksperimente kirjeldatakse pisut põhjalikumalt kui kolmanda faasi omi. Põhjus seisneb selles, et kolmanda faasi katsed on juba populaarteaduslikus kirjanduses detailsemalt dokumenteeritud, teisalt kasutatakse nende eksperimentide tulemusi alapeatükis 3.2. rohkem kui esimese ja teise faasi eksperimentide tulemusi. Siinkirjutajale ei ole teada kõik rauasulatuskatsed, mida Eestis tehtud on, kuna lisaks teadlastele ja nendega seotud taaskehastajatele proovivad rauda sulatada ka teised huvilised, kelle katsetest sageli kirjasõnalist märki maha ei jää. Kuna allakirjutanu on osalenud mitmel Ragnar Saage eksperimentidel, siis pärinevad mitmed detailid ja märkused ka autori enda kogemustest, mida pole veel kuskil publitseeritud.

3.1. Rauasulatuseksperimentid Eestis

3.1.1. Esimene faas: 1970. aastate lõpp

Eesti esimene rauasulatuskatse toimus 17. jaanuaril 1978. aastal ning selle viis läbi ehitusinsener Arvi Lauringson. Erinevalt hilisematest välikatsetest toimus esimene eksperiment sisetingimustes Jüri EMV tootmisbaasi ehituslaboratooriumi tõmbekapis (Lauringson 1995, 16). Tollal ei olnud ühtegi arheoloogilist sulatusahju põhja Eestis leitud, mille põhjal oluks võimalik ahju endisaegsed mõõtmed osaliselt taastada. Puudusid ka teised teadmised rauasulatus algtoodetest. Seetõttu tehti suuri ettevalmistusi, mis väärivad siinkohal tsitaadina väljatoomist: “Hangiti teadmisi arheoloogidelt, metallurgidelt, keemikutelt, pottseppadelt, soojustehnikutelt ja teistelki ametimeestelt. Kolme kuu jooksul uuriti maagi ja pürometallurgia üksikasju umbes viiekümnest raamatust. Sulatus-taandamiskollete ehituse kohta hangiti andmeid arheoloogide teostest, mis käsitlevad muistset pürometallurgiat Karjalas, Kostroma oblastis, Poolas, Lätis ja mujal.” (Lauringson 1978, 28)

Esimene katseahi tehti siiski juba 1977. aastal Jüris (Lauringson 1995, 76), kuid tekstis ei mainita, et selles oleks püütud rauda sulatada. 1978. aastal laboritingimustes püstitatud ahi oli ebapraktiliselt väike: ahju kõrguseks oli 17 cm ja selle suudmest põhja suunas laieneva šahti läbimõõt 7–13 cm, mis teeb õõnsuse mahuks vaid 1410 cm³ (*ibid.*, 16–17). Ahju ehitamisel kasutati põhiosas pulbersavi ja kaeti viimaks 1–2 cm paksuse šamottsavi kihiga (*ibid.*), seinapaksuseks oli 10–12 cm (Lauringson 1978, 29). Ahi täideti lehtpuusöe, kohaliku soomaagi ja lubjakiviga, mida kasutati rübustina, kihiliselt, nagu näidatud joonisel 29 (*ibid.*). Õhu pumpamiseks ahju kasutati kolme akvaariumi vibraatorpumpa, mis osutusid katse käigus liiga nõrgaks ja need asendati mesiniku käsilöötsaga (*ibid.*, 29–30).



Joonis 29. Arvi Lauringsoni esimese katsekolde joonis. (Lauringson 1978, 29)

Milliampermeetriga varustatud kromell-alumell-(XA)-termopaariga mõõdeti katse käigus ahjusisest temperatuuri, mis jõudis pisut vähema kui kahe tunniga 378°C kraadini ja hakkas peale seda järk-järgult langema (Lauringson 1995, 17–18). Kokkuvõttes oli ligi kolm tundi kestnud eksperiment raua tootmise mõttes ebaõnnestunud, kuid toodetud raua kogus ei olnudki oluline – Lauringson tahtis tõestada, et kohalikust maagist on võimalik rauda sulatada ja vähesel määral see ka õnnestus. Ahjust saadud räbu- ja rauapuru ümbersepistamisel õnnestus Lauringsonil saada mõni gramm ehedat rauda (*ibid.*, 20). Kuigi esimeses katses oli hulganisti vajakajäämisi, oli tulemusest olulisem sündmus ise ja selle laiem tagamõte, mille võttis hästi kokku Vello Lõugas: „Usun, et sellest eksperimentidist saadud kogemused suurendavad vähemalt lugupidamist esivanemate oskuste vastu, metallurgia-ajaloo lisateadmistest rääkimata.“ (*ibid.*) Laborikatses tehti kolm olulisemat järeldust: 1) ahi tuleb enne kütmist korralikult kuivatada; 2) õhuhapniku juhtimine koldesse peab olema võimsam; 3) ahjude ehitust ja vormi tuleb selgitada arheoloogiliste väljakaevamiste abil (Lauringson 1978, 30).

1978. aasta kevadel otsustati korraldada ka esimene välikatse. Kirjanduse abil jõuti selgusele ahju mõõtmetes: ümara ristlõikega ahju kõrguseks võis olla umbes 80 cm – üks inimese käe pikkus, et ulatuks vajadusel ka ahju siseseina siluma – ja siseõõnsuse läbimõõt suudme kõrguselt 20 cm, põhjast 30 cm (Lauringson 1978, 30). Elusuuruses katseahi püstitati Väana

jõe ääres Tugamannis, esimene katse toimus 23. mail. Lõuna-Eestist toodud sepalõõtsa ehk *tünderlõõtsa* abiga saavutati sel korral ahjus 1020°C, kuid seda peeti katseahju jaoks liiga suureks, sest ahju seintesse tekkisid praod. (*ibid.*) Ka sel korral ei õnnestunud metallilist rauda toota, osalt madala temperatuuri tõttu, osalt ka seepärast, et katseahju ei tahetud lõhkuda, vaid kasutada ka järgnevatel katsetel ning õppepäevadel. Ahjust eemaldatud tuha ja räbu hulgest leiti siiski magneti abiga algeliselt moodustunud rauaterasid. (Lauringson 1995, 80–81). Seega oli Arvi Lauringson tõestanud, et Eesti kohalikust rauamaagist on võimalik rauda sulatada ja sellest esialgu piisas.

3.1.2. Teine faas: 1980.–1990. aastad

1980. aastatel alustas Eesti rauametallurgia uurimisega arheoloog Jüri Peets, kelle põhiliseks uurimisobjektiks kujunes alates 1986. aastast Tuiu Rauasaatmemägedes asuv rauasulatuskompleks (Peets 2003, 17). Kümnete teiste uuritud rauasulatuskohtade seast on Tuiu andnud kõige paremaid tulemusi muistse taandamisprotsessi rekonstrueerimiseks, mis andsid olulise sisendi ka tulevastele eksperimentidele.

1988. aastal kerkis Tuiu Rauasaatmemägedes esimene eksperimentaalkolle (nr 1), mille ehituslikuks eeskujuks võeti sealtsamast leitud 12.–13. sajandisse dateeruv ahi (Peets 2003, 132–133). Sarnaselt teistele ehitistele ei säili ka rauasulatusahjud täielikult kolmemõõtmelistena – alles jäävad ahjupõhjad, mis võivad ka vertikaaltasandil mingil määral säilida, kuid näitavad kolde mõõtmeid siiski rohkem horisontaaltasandil. Ahju kõrguse rekonstrueerimisel eeldati sarnaselt Lauringsonile, et ahi pidi olema ka seestpoolt voolitav, mistõttu võis selle kõrguseks olla inimese käe pikkus ahk 80–90 cm (*ibid.*, 133). Eksperimendis kasutatud süsi miiliti ise kohapeal, rauamaak toodi Põhja-Eestist Lahemaa rahvuspargist Tõugu Rauasoost, sest Tuiu kohalikke maagivarusid ei olnud veel leitud. 22. septembril 1988 toimus esimene eksperiment, mille käigus toodeti 7 kg rauamaagist 680 g metalli – liiga intensiivse lõõtsatöö tulemusel sulas toodetud raud valgemalmiks. Järgmisel katsel purunesid lõõtsad. (*ibid.*)

1989. aastal ehitati Tuius väliääs ja kaks uut ahju (nr 2 ja 3), millest üks oli osaliselt maasse süvendatud ja identne ahjuga nr 1, teine ehitati aga tervenisti maa peale ja selle seina puuriti augud, et mõõta erinevatelt kõrgustelt koldesisest temperatuuri. Ahjudega nr 1 ja 2 tehti kokku 9 eksperimenti, kuid toodetud raua kogused jäid lõpuni väikseiks – parimal katsel toodeti vaid 200 grammi jagu rauda, mis oli omadustelt sarnane arheoloogilisele rauale (Peets 2003, 133).

1990. aasta sügisel korraldati veel neli katset ahjuga nr 3. Katse käigus registreeriti düüsi juures temperatuur 1400°C ja ahju ülaosas 300–400°C. Sarnaselt varasematele Peetsi eksperimentidele lasti vedel šlakk ahjust välja alles katse lõpus. Kui juba Lauringsoni katsete tulemusel jäi rübusti vajalikkus küsitavaks, oli kõnealuse katse üheks eesmärgiks see välja selgitada. Selle tarbeks segati 8 kg rauamaaki 1,7 kg lubjakivipurraga ning katse lõppedes tõdeti, et ajaloolise otsetaandamise käigus ei ole rübustit kasutatud. Neljandal katsel sama ahjuga prooviti uut lähenemist – peale esimese sulatustsükli lõppu lasti vedel šlakk ahjust välja, kolle täideti uuesti puusöe ja maagiga. Kokku kasutati 22 kg maaki ja toodeti 2 kg rauda. Katse edukus tõestas ühe võimaliku meetodi, kuidas muistsed rauasulatajad on suuremaid rauakoguseid tootnud, tõhusust. (Peets 2003, 133–134) Õhku jäi siiski küsimus, milline oleks tulemus juhul, kui maaki väikestes kogustes juurde lisada (*ibid.*). Sellele küsimusele annavad vastuse kolmanda faasi eksperimendid. Oluline on siiski mainida, et Jüri Peetsi eksperimentide aegu ei olnud Eestist teada ühtegi kohalikku kaubatoorikut, mis oleks andnud aimu muinas- ja keskajal toodetud raua väljanägemisest ja kogusest. Nüüd, kui kohalike kaubatoorikute koguarv on jõudnud 42-ni, teame nende olemust ja teame ka eksperimentidel, milline võiks katse tulemus olla. 1996. aastal ehitas Peets Palmses Lahemaa rahvuspargis veel kaks Tuutuüpi rauaahju ja tegi eelnevalt ka söemiilimiskatse (Peets 2003, 41–42). Kokkuvõtvalt oli Jüri Peets tõestanud, et kohalikku tüüpi ahjuga on võimalik kohalikust maagist rauda taandada.

3.1.3. Kolmas faas: 21. sajand

Ragnar Saage rauasulatuskatsed said alguse 2015. aasta suvel Rõuge muinastalus, kus püüti kohalikust Rõuge allikamaagist kirjanduse põhjal ehitatud ahjuga rauda taandada. Esimene katse ebaõnnestus peamiselt kasutatud lõõtsade väikeste mõõtmete tõttu – need ei suutnud suurt ahju piisaval määral õhutada, et temperatuur vajaliku tasemeni küündiks. Kasutatud ahjul oli kaks õhutusava ja vaid üks šlaki väljalaskeava. Teine katse tehti juba sama aasta sügisel sama ahju, sama maagi ja suurema, ligi kahe meetri pikkuse sepalõõtsaga, kuid kõigi püüdluste kiuste ei saadud šlakki voolama ja katse oli nurjunud. Sama ahjuga tehti uus katse 2016. aasta suvel ning sel korral oli ebaõnnestumise põhjuseks tähelepanematus – seltskond sattus vulkaani meenutavast ahjust vaimustusse ja nii põletati ära kogu ahju pandud maak. 30 kg Rõuge allikamaagist saadi 4 kg nõrgalt magnetiseeruvat šlakki. Samal aastal tehti kaks eksperimenti Saaremaal Salme Viikingituru sepa õpitoas, kus tulid appi välismaa metallurgid. Uus ahi ehitati Rõuge omast märksa väiksem, esimesel katsel kasutati Sloveenia järveaaki, teisel korral prooviti taas Rõuge allikamaaki. Kuna Rõuge maak ei moodustanud voolavat šlakki, lisati

sellele paar teelusikatäit booraksit ehk räbustit, mille tulemusel hakkas moodustuma vedel šlakk. Ligi seitse tundi väldanud sulatuse tulemuseks saadi 15 kg maagisegust ligi 200 g jagu rauda. (Järvpõld ja Saage 2016, 40–41; Saage ja Järvpõld 2018, 61). 2017. aastal tehti Rõuges kohaliku maagiga veel kaks ebaõnnestunud katset – taandatud rauaosakesed olid ahju põhjas laiali, moodustamata ühtset kogumit (Saage ja Ratas 2017, 48–49). Esimene edukas katse toimus 2018. aastal Rõuges, kus püstitati varasemast väiksem ahi, mille eeskujud pärinevad 5.–7. sajandist Põhja-Valgevenest ja 8. sajandist Pihkvast. Kõnealusel koldel oli vaid üks avaus, mille kaudu toimus lõõtsaga õhutamine ning mille nurgast lasti välja sulašlakki. Lisaks Rõuge allikamaagile lisati ahju ka Tallinna teletorni lähistelt leitud maaki vahekorras 1:1. Sulatus kestis üle viie tunni ja tulemuseks saadi umbes 20 kg maagisegust 1,5 kg raskune rauapäts. (Saage ja Järvpõld 2018, 60–61)

Alates 2021. aastast on ka allakirjutanu võtnud osa mitmetest Ragnar Saage eksperimentidest, neid dokumenteerinud ja osaliselt töökulgu ka juhtinud, mis on aidanud kaasa kogu protsessi paremale mõistmisele. Kõnealuse aasta esimene eksperiment toimus Tallinna lähedal Saula Viikingite külas ja tegu oli mitmes mõttes märgilise sündmusega. See oli esimene Ragnar Saage katse, kui eeskujuks võeti Jüri Peetsi Tuiust leitud rauasulatusahi 12.–14. sajandist, katsetati õhutusdüüsi ja ahju põhja paigaldatud lameda maakivi funktsionaalsust ja esimest korda võeti eesmärgiks kasutada ainult Harjumaa tooraineid. Ahju püstitamiseks vajalik savi toodi Kõue lähedalt Vahetüki külast, rauamaak pärines Kuusalu vallast Kupu külast Näkiallika Tööriistamuuseumi juurest. Tegemist oli seni edukaima eksperimendiga: pisut rohkem kui neljatunnise sulatuse vältel toodeti 22 kg maagist 3,2 kg rauda. Käsnaud vasardati puupakul koheselt risttahuka-kujuliseks ja löödi kirve abil pooleks. (Saage 2021, 22–23)

2022. aastal tehti kaks katset. Rõuge muinastalus toimunud „Rauatalgutel“ valmistati umbes 40 kg Botaanikaaria maagist 2,5 kg rauda. 37 cm läbimõõduga ahjušaht osutus liiga suureks ja lõõtsad jäid selle korralikuks õhutamiseks liiga väikseks. Viljandimaal Piiraja talus toimunud katsel kasutati kohalikku savi ja Botaanikaaria maaki. 4,5 tundi kestnud sulatuse lõpuks toodeti 38,8 kg maagist 3,3 kg rauda. Mõlemal katsel kasutati õhutuslõõrikuga Tuiu-tüüpi ahje.⁴⁶

2023. aastal tehti kokku kolm eksperimenti. Tartumaal Rookse külas toimunud katsel kasutati kohalikku savi ja Tallinna teletorni maaki, millele lisati ka kohalikke maagivorme – Rookse *juuremaaki* ja *lögamaaki*, mida koguti lähedalasuva Luutsna jõe kaldailt. Katse käigus valmis

⁴⁶ 2022. aasta katsete kirjeldus põhineb Ragnar Saage suulisel teatel.

5,2 kg rauda, mis oli sel hetkel uus rekord. (Oks 2023, 30–31) Piirjal tehti järjestikku kaks katset kahe erineva ahjuga. Neist üks ebaõnnestus, kui kasutati osaliselt šamottelistest ehitatud ahju ja Meleskist kogutud maaki. Teine katse Tuiu-tüüpi ahjuga oli edukas, kuna 40 kg Botaanikaia maagist sulatati 3,9 kg rauda.⁴⁷

2024. aasta oli rekordiline ja seda mitmest aspektist. Suve jooksul viidi läbi neli katset neljas eri kohas ja kasutati erinevaid savisid ning maake. Esimene katse toimus kohaliku kogukonna osalusel Karulas Rebasemõisa külas Hallimäe talus, kus kasutati kohalikku savi, talu perepoja miilitud sütt koos grillsöega ning Valgamaalt Raualaane-nimelisest kohast pärit rauamaaki. Poolteist tundi peale sulatuse algust selgus, et Raualaane maak ei tekita ahju põhja vajalikku vedelat šlakki, mistõttu hakati sellele lisama võrdses koguses Tallinna Botaanikaia lähistelt leitud maaki, mis tekitab väga head šlakki. Sulatus kestis üle kuue tunni ja protsessi tulemiks oli ligi kuuekilone rauapäts, mis sepistamise käigus paraku laiali pudenes. Allakirjutanu tegi katsel valminud rauast metallograafilise analüüsi, millest selgus, et raua rabadus tuleneb selle suurest P-sisaldusest. See tõestas, et Raualaane maak ei ole raua sulatamiseks soodus. (Saage ja Oks 2024, 25–26) Teine katse toimus Rõuge muinastalus, kus kasutati kohalikku savi, tõrvaajamise kõrvalsaadusena valminud okaspuusütt ja Jõgevamaalt Pedassaarest pärit rauamaaki. Viimane oli taas ebasoodus vedela šlaki tekkimiseks, seega lisati taas Botaanikaia maaki. Viietunnise sulatuse tulemiks oli ligi kahekilone rauapäts, mis oli sepistamiseks soodsate omadustega. (*ibid.*, 26) Kolmas katse toimus Metsakivi külas Tartumaal, kus kasutati kohe Pedassaare ja Botaanikaia maagisegu. Erinevalt tavapärasest kombest voolida ahjule inimnägu, tehti sel korral ahi naiselike vormidega ning sellest võeti välja ligi kolmekilone rauapäts. (*ibid.*) Neljas ja viimane katse viidi koos EKA tudengitega läbi Piirja talus, kus kasutati taas Pedassaare ja Botaanikaia maagisegu. Seitse tundi väldanud sulatuse tulemuseks oli rekordiline 6,8 kg kaaluv rauakamak. (*ibid.*, 26–27)

Üldiselt on rauasulatuskatsed muutunud populaarseks ka laiemalt, mitte vaid teadlaste ja taaskehastajate seas. Rauda on proovitud sulatada näiteks ka Bushcraft festivalil (Vaikre 2024, 76–81), kuid paraku jõuavad sellised eksperimendid harva laiemale avalikkuse ette.

⁴⁷Piirja katsete kirjeldus põhineb Ragnar Saage suulisel teatel.

3.2. Rauasulatusprotsess

Raua sulatamine on mahukas ettevõtmine, mis jaguneb erineva sisuga etappideks: esmalt alustatakse toorainete varumisest ja nende eeltöötlemisest, seejärel püstitatakse vajalikud konstruktsioonid, millele järgneb mõne aja pärast raua taandamine ja selle hilisem töötlemine. Järgnevalt on lahti kirjutatud kõik etapid ja nendega seotud üksikasjad nii, nagu allakirjutanu loetu ja enese kogemuste põhjal nendest aru on saanud. Tööetappide kirjeldamisel võetakse aluseks peamiselt autori enda osalusel toimunud rauasulatuskatsed, kuid näiteid tuuakse ka teistest eksperimentidest ning Eesti ja naabermaade arheoloogiast. Alapeatükis 3.2.3. kirjeldatakse raua taandamist Tuiu-tüüpi ahjus, millel on üks õhutusava ja kaks šlaki väljalaskeava. Seega ei käsitleta teisi ahjutüüpe, mis küll alapeatükis 3.2.2.1. äramainimist leiavad, kuid millega allakirjutanul isiklik katsekogemus puudub.

3.2.1. Tooraine varumine

Raua tootmiseks vajalikud toorained on valdavalt Eesti loodusest vabalt kättesaadavad, kui teada, kust otsida. Kasutatavatest toormetest ainsana tuleb inimesel ise valmistada ahju kütuseks kasutatav puusüsi, mida sellisel kujul looduses ei leidu, vähemalt vajalikul määral⁴⁸.

3.2.1.1. Savi

Savi on peamiselt erinevatest savimineraalidest koosnev peenpurdsetend, mille osakesed on väiksemad kui 0,01 mm (Isakar 2011). Savide hulka kuuluvad kõik saviainet sisaldavad silikaadid, mis moodustavad teatava veehulga lisamisel hästi voolitava massi, mille plastilisus kaob kuivamisel mööduvalt, kuid põlemisel jäädavalt (Krusenberga 1932a, 55). Sellel omadusel põhinebki savide kasutamine keraamikas (Isakar 2011). Eestis on läbi ajaloo kasutatud erinevaid kohalikke savisid: Põhja-Eestis Kambriumi sinisavi, Lõuna-Eestis Devoni savi ja üle kogu Eesti ebahühtlase koostisega Kvaternaari savisid (*ibid.*). Eestis ei ole rauasulatamisel kasutatud savisid veel uuritud, kuid on kindel, et kõik Eestis leiduvad savid selleks ei sobi – raua taandamiseks on tarvis saavutada kõrgeid temperatuure (umbkaudu 1200–1350°C; Peets 2003, 44), mida peavad ka ahjuseinad suutma taluda. Savid jagatakse sulamistemperatuuride järgi erinevatesse klassidesse: kergsulavad savid (sulamistemperatuur alla 1380°C, näiteks Kambriumi sinisavi) ja raskesulavad (sulamistemperatuur 1380–1450°C, peamiselt Devoni

⁴⁸ Allakirjutanu viitab söe võimalikule esinemisel looduses peale maastikupõlenguid, kuid sellise söe kasutamine kütusena ei kõla kuigi tõenäoliselt.

savid Lõuna-Eesti alal) (Isakar 2011). Esimese Eesti Vabariigi ajal eristati isegi „tulekindlaid“ savisid, mille sulamistemperatuur on kõrgem kui 1580°C, kuid selliseid savisid Eestis ei leidu (Krusenberg 1932, 56).

Savi on universaalne materjal, mida läheb rauasulatamisel vaja mitmeks puhuks. Peamiselt leiab savi kasutust sulatusahju ehitamisel, kuna moodustab selle seinte koostises teiste võimalike lisandite kõrval valdava enamuse. Ka lohkääsi püstitamisel võib savi vaja minna, kui tahta ääsikivide vahed õhukindlalt sulgeda. Puhas savi ei ole omadustelt vajalike konstruktsioonide rajamiseks kuigi hea, mistõttu lisatakse eksperimentidel sellele sageli liiva ja põhku (Saage 2021, 22). Õlgede lisamine savimassi aitab tugevdada ahjuseinu (Oks 2023, 31), funktsioneerides armatuurina – allakirjutanule meenutab see raudbetooni tööpõhimõtet. Küll aga on igasuguste lisandite sidumine värskelt välja kaevatud saviga mõnevõrra raskendatud, kuna see võib olla väga sitke ja kõva – see hinnang põhineb 2023. aasta Rookse ja 2024. aasta Karula Hallimäe eksperimentidel, kus savi käsitsi pehmemaks muditi. Selline käsitöö on väga ajakulukas ja kurnav, mistõttu tundub, et muistsed metallurgid, kelle jaoks oli raua tootmine eluliselt tähtis, lähenesid sellele tööetapile hoopis nutikamalt. On ka püütud savimassi jalgadega sõtkuda, mis on efektiivsem, kui kätega muljuda, kuid miskipärast seda eksperimentidel väga sageli ei harrastata. Siinkirjutajale näib võimalikuna ka järgnev lahendus: savi tuleb õhukeses kihis ära kuivatada, seejärel purustada peenemaks ning segada koos liiva, muude lisandite ja veega paraja paksusega massiks. Seni on see katsetel jäänud vaid teooriaks, kuid Ragnar Saage on samal meetodil valmistanud näiteks õhutuslõõrikuid.

Peale ehitusmaterjali on savi ka heaks kaitsevahendiks sepale hilisema raua vasardamise käigus. Käsivartele määratud märg savi moodustab sõltuvalt kihi paksusest varieeruva termoresistentsusega kaitsekihi, mis takistab sepistatavast rauast välja lendaval šlakil ja sädemetel käsivarsi kõrvetamast. Allakirjutanu on seda proovinud kahel korral ja see meetod on ennast õigustanud.

3.2.1.2. Rauamaak

Eesti geoloogilises aluskorras esineb rauamaaki ainult Jõhvist vahetult idas, kus on tugev magnetanomaalia, mille põhjustajaks on mahukas ($6 \times 10^9 \text{ m}^3$) rauamaagi kehand. Maagi peamiseks rauaühendiks on magnetiitkvartsiid, mis sisaldab vähesel määral ka püriiti ja pürrhotiiti ning paikneb kihiti teiste aluskorra kivimite, graniitide, pegmatiitide ja gneissidega vaheldumisi suunaga maa sisemuse poole ehk subvertikaalselt. (Plado *et al.* 2020, 189–191)

Võttes arvesse, et nimetatud maagivarud asuvad enam kui 200 m sügavusel (*ibid.* 196–197) ei ole neid ilmselgelt muinas- ja keskajal kohaliku rauatoormena kasutatud. Ka kaasajal ei ole maagikehandi subvertikaalse lasumuse tõttu nähtud potentsiaali selle kaevandamisel⁴⁹.

Muinas- ja keskajal on Eestis raua tootmiseks kasutatud soomaaki ehk *limoniiti*, mida rahvasuus ka soorauaks kutsutakse. Limoniit⁵⁰ on poorne ja hästi taandatav, kuid võib sisaldada keskmisest rohkem fosforit (Pleiner 2000, 88). Üldiselt võib rauamaaki leida kõikjalt, kus saavad kokku vees lahustunud rauaosakesed ja hapnik (Oks 2024, 51). Maagi tekkeprotsessis mängivad olulist rolli nii pinnareljeef, rauaühendite hulk pinnases, rauabakterid ja muud tegurid (Peets 2003, 31–35). Lisaks kuival maal leiduvatele maakidele esineb Eestis ka järvemaaki, näiteks Vagula järves Võrumaal (Riikoja 1936). Maagivormide eristamiseks on neile antud ka erinevad nimetused, mis tulenevad maagikogumite kujust. Heinrich Riikoja kirjutab 1936. aastal Eesti Looduses avaldatud artiklis järgnevalt: „Nii eristatakse, olenedes terasuurusest, kerakujuliste konkretsioonidega püssirohi-, haavel- ja hernesmaaki, kettakujulist müntmaaki, enam-vähem neerjat ubamaaki, käävmaaki, nurgelistest tükkidest koosnevat kantmaaki, toru- ja rennmaaki, kilpmaaki, järvepõhjas suuri koorikuid moodustavat kakkmaaki jne.“ 2023. aastal Rookse eksperimendil kasutatud taimejuurte ümbert kogutud toruja maagi ning vedela mudase maagi nimetas allakirjutanu vastavalt *juuremaagiks* ja *lögamaagiks* (Oks 2023, 30).

Mauri Kiudsoo on Tõdva rauasulatuskoha puhul viidanud ka võimalusele, et seal on kasutatud merelist päritolu raua-mangaanikonkretsioone, mille tulemusel on Tõdva šlakis kõrgem mangaani- ja väiksem P-sisaldus, kui samast kohast leitud limoniidil (Kiudsoo 2009, 100–101). Siiski ei ole sellise maagi kasutamise kohta veel piisavalt arheoloogilisi tõendeid ning tehtud analüüside tulemused on liiga napid, et midagi kindlat väita. Tekib ka küsimus, miks ei olnud rauasulatuskohal jälgi mainitud merelise tekkega rauamaagist, ent leiti hoopis soomaaki.

3.2.1.3. Puusüsi

Puusüsi oli enne fossiilsete kütuste kasutuselevõttu peamine kütuseliik, mida kasutati erinevate suurt kuumust nõudvate tootmisprotsesside juures nagu klaasi tootmine ja erinevad metallitööd, kaasa arvatud rauasulatus (Saage *et al.* 2024, 57). Rauasulatuskatsete tulemuste põhjal tehtud arvutused näitavad, et 100 kg raua tootmiseks oli vaja ligi 1,3 tonni puusütt –

⁴⁹ Allakirjutanu osales 2022. aasta sügissemestril TÜ loengukursusel “Eesti aluspõhja geoloogia ja maavarad” (LTOM.03.011), viide pärineb allakirjutanu loengukonspektist.

⁵⁰ $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ või $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Pleiner 2000, 88)

mille valmistamiseks kulus omakorda 20 m³ puitu (Peets 2003, 40). Jüri Peetsi arvutuste kohaselt toodeti Saaremaal Tuuu-Pelissoo piirkonnas 12.–14. sajandil 1500–2000 tonni rauda, mille sulatamiseks vajamineva söe miilimiseks kulus 300 000–400 000 m³ puitu – võib vaid ette kujutada, milline vaev oli vajamineva puidu varumine ja tükeldamine, kui kasutada olid ainult kirved (*ibid.*). Kindlasti oli sellise mastaabiga söeteol märgatav ökoloogiline mõju ümbritsevale maastikule. Söeosakeste- ja õietolmudiagrammid Tuuu lähistel asuvast Jõhvikasoo näitavad söeosakeste märgatavat kasvu viikingiaja alguses – umbes sel ajal algas Tuuus kohalik rauataandamine (*ibid.*, 101–103).

Söe miilimiseks tuleb põletada puitu hapnikuvaeses keskkonnas. Eesti aladel on muinas- ja varasel keskajal miilitud sütt keskmiselt 1,5–5 m läbimõõduga ja kuni 70 cm sügavustes lohkudes, miilikuhtjad tulid kasutusele keskajal. Selliseid miililohke, mille mõõtmed võivad küll varieeruda, on leitud näiteks Tuuu, Raatvere ja Olustvere rauasulatuskohtadest. (Peets 2003, 38–40) 2024. aastal uuriti Karulas Kakulaanes suuremat söemiilimiskompleksi, kus leidis nii miililohke kui -kuhtjasid (Saage *et al.* 2024, 57). Arheoloogilise söe uurimine on andnud olulist teavet ka kasutatud puuliikide kohta: Tuuu neljast miiliaugust kogutud söeproovide hulgas domineeris harilik mänd, lehtpuudest oli levinuim kask, kuid esines ka leppa, tamme, haaba ja saart (Peets 2003, 39). Kakulaane esialgsete määrangute järgi miiliti seal sütt peamiselt harilikust männist, mille seas ka kuuske ja lehtpuid leidis (Saage *et al.* 2024, 57). Seoses rauasulatuskatsetega hakkas Jüri Peets 1988. aastal ka ise sütt miilima (Peets 2003, 40–42). Nii on korduvalt proovitud teha sütt miilikuhtjades ja -aukudes, on olnud edukaid ja ebaõnnestunud eksperimente. Parimal katsel õnnestus toota 200 kg puusütt. (*ibid.*)

3.2.1.4. Rübusti

Uurijates on palju segadust tekitanud rübusti kasutamine raua taandamisel. Arvi Lauringsoni katsetel jäi rübusti kasutamise vajalikkus küsitavaks (Lauringson 1995, 18). Ain Lavi ja Jüri Peets on teinud šlakkide ja maakide keemilise analüüsi järel otsekoheise järelduse, et muistses taandamisprotsessis ei ole lubjakivi rübustina kasutatud (Lavi ja Peets 1984, 46). Peets on seda järeldanud ka oma katsete põhjal (2003, 133–134). Samas on kolmanda faasi katsed näidanud, kui oluline on vedela šlaki tekkimine sulatusprotsessi edukaks kulgemiseks, mida mõningad maagid, nagu Rõuge allikamaak, ei võimalda (Järvpõld ja Saage 2016, 41). Liiva kasutamine rübustina ei ole katsetel samuti õnnestunud (Saage ja Oks, ilmumisel). Selliste maakide puhul oleks võimalik kasutada rübustina ka juba varem toodetud šlakki, kuid seni ei ole seda katsetel proovitud (*ibid.*).

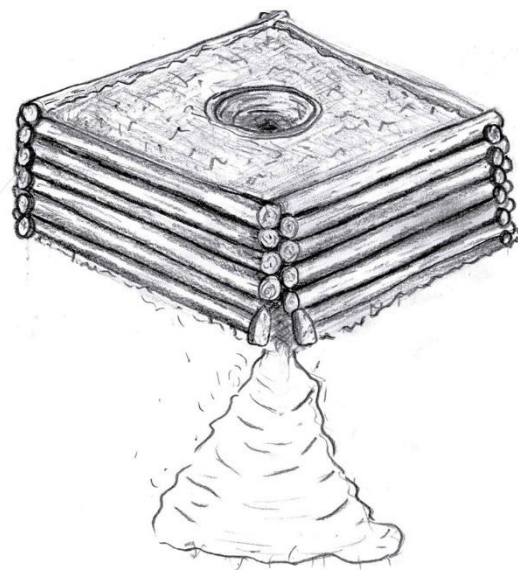
3.2.2. Eeltööd

3.2.2.1. Ahju püstitamine ja ahjutüübid

Nagu eelpool öeldud, kirjeldatakse järgnevalt raua taandamisprotsessi Tuiu tüüpi ahju näitel, kuid siinkohal on paslik tuua välja ka teised ahjutüübid, mida Eesti aladel muinas- ja keskajal kasutatud on.

Nelinurkne palkraketisega ahi (timber-curbed furnace)

Arheoloogilise leiuainese põhjal on Eestis tinglikult eristatavad neli ahjutüüpi. Neist ehk kõige müstilisem on nelinurkse palkraketise ja savist šahtiga ahi (joonis 30), mille jäänuseid on leitud Mäetaguse Metsküla ja Tindimurru rauasulatuskohtadest ja võib-olla ka Raatverest (Peets 2003, 68, 75–76). Metsküla ahju nr 1 põhjal on nelinurkse palkraketise keskel olnud 30–40 cm läbimõõduga 2,5–3 mm paksuste savist seintega ahjušaht, raketise ühes nurgas on olnud 25–35 cm laiune ja 150–155 cm pikkune süvend, mida on kasutatud kas šlaki väljalaskmiseks või õhu sissejuhtimiseks



Joonis 30. Nelinurkne palkraketisega ahi. Autori käsijoonis Peets 2003, 70, joon. 19 eeskujul.

(*ibid.*, 53). Kaevandi alalt leiti kõrgematest kihtidest palju savist õhutuslõõrikute katkeid, mida Peets seostas võimaliku hilisema, 12.–14. sajandi tootmistegevusega (*ibid.*, 55). Kõik Metsküla ahjud olid enam-vähem 1,5 × 1,5 m suurused (*ibid.*, 322–323). Seni ei ole taolise ahjutüübiga Eestis ühtegi katset tehtud, mistõttu puudub selge ettekujutus, kuidas sellega raua sulatati. Tindimurru ahjupõhjad on olnud mõnevõrra suuremad (1,9 × 2,1 m ja 2,2 × 2,5 m) (*ibid.*, 58).

Sarnase konstruktsiooniga ahje on kasutatud 9.–10. sajandil Islandil, mille heaks näiteks on Hálsi leiukompleksi saare lääneosas (Smith 2004, 187–195). Sealt leitud rauasulatusahju rekonstruktsioon (*ibid.*, 203, fig. 11.5) sarnaneb mõõtmetelt väga Tindimurru ja Metsküla ahjudele horisontaaltasandil, võimaldades ehk viimaseid ka vertikaaltasandil paremini rekonstrueerida ja mõtestada. Hálsi ahju keskel on olnud savist šaht, mille seinapaksus on 3 cm (*ibid.*, 191), sarnanedes väga Metsküla leiule. Hálsi ahjušahti ümbritses väljapoole langeva

kallakuga toetus, mis oli laotud mätastest ja uhtliivast/mudast, toestust ümbritses tõenäoliselt puidust rake. On oletatud, et ahi ei olnud kõrgem kui 70 cm ja et ahju ümbritsev puitraketi võis täita platvormi rolli, millelt toimus söe ja maagi lisamine koldesse ning hilisem raua väljavõtmine. (*ibid.*, 192) Hålsi ahju ühel küljel on olnud suurematest kividest ääristatud V-kujuline tööruum ja koldeava, mille kaudu käis oletatavasti õhu sissejuhtimine ja võib-olla šlaki väljalaskmine, kuigi tervest Hålsi kompleksist ei ole leitud väljalaske-šlakki (*tapping slag*) – enamasti sarnaneb sealne räbu tüüpilisele šahtahju rübule (*ibid.*, 192–193). Ei ole leitud ka savist õhutussõõrikuid, mistõttu arvatakse, et õhuvoolu koldesse juhtimiseks kasutati rauast lõõtsaotsikuid (*ibid.*, 190–191).

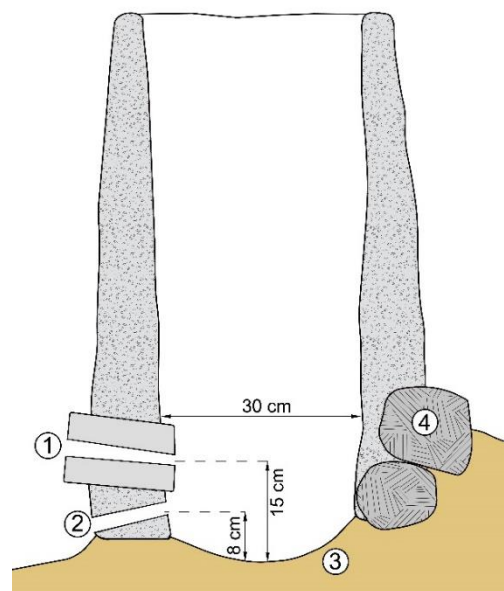
Põhjakiviga ahi (granite-based furnace)

Ainus kindel Eesti näide kivile ehitatud ümmarguse põhiplaaniga ahjust pärineb Tartust Lossi tänavalt (Metsallik 1995, 28). Jüri Peets on oletanud, et sama tüüpi ahju võidi kasutada ka Päite külas Ida-Virumaal, kust leiti suur lame graniitkivi, mille keskel oli sulanud pinnaga lohk (Peets 2003, 70). Häid vasteid sellisele ahjutüübile leiab Lätist, näiteks Spietini asulakohalt (1.–4. sajand) (Rundberget 2018, 99) ja Koknese linnuselt (5.–6. sajand), kus rauasulatusahjude põhjas olid suured raudkivid (Peets 2003, 70).

Tuiu-tüüpi ahi (furnace of the Tuiu-type)

Tuiu rauasulatuskompleksis Saaremaal on kasutusel olnud õigupoolest kaks põhijoontes sarnast, kuid siiski pisut erinevat ahjutüüpi. Esimene tüüp on tervenisti maapealne, 90–100 cm välis- ja 30 cm siseläbimõõduga. Ahjuseinad olid ehitatud savi- ja liivasegust, need olid alt 20–25 cm paksused ja väljastpoolt poolkaares kividega toetatud, seinad võisid kõrgemal kitsamaks minna. Teisi ehituslikke detaile ei olnud paraku säilinud. (Peets 2003, 127)

Teine ahjutüüp on põhiliselt sarnaste parameetritega, kuid osaliselt maasse süvendatud nii, et selle tagaseina on kuni 40 cm kõrguselt toetanud liivapinnas. Seda tüüpi ahjude esiküljel on kaks 4–5 cm laiust räbu väljalaskeava, nende vahel on olnud õhutussõõrik,



Joonis 31. Osaliselt maasse süvendatud Tuiu-tüüpi ahju rekonstruktsioon. (Saage ja Oks, ilmumas)

mille ava oli ahjupõhjast 14–15 cm kõrgusel (Peets 2003, 127; joonis 31; Lisad, foto 27). Seda tüüpi ahi on näiteks rauaahi F2 Tuiu kaevandist A1, mida allakirjutanul õnnestus 2022. aastal ka ise kaevata. Nimetatud välitöödel viidi lõpule ahju F2 kaevamine ja täpsustati selle parameetreid (Unt *et al.* 2023, 103–104).

Šlakiauguga ahi (slag pit furnace)

Mauri Kiudsoo on püstitanud hüpoteesi, et nii Tõdval kui ka Varbola linnuses on kasutatud teatud šahtahju alamtüüpi, millel puudus šlaki väljalaskeava⁵¹. Tõdvalt on leitud kolm rauataandamiskollet: need olid ligi 35 cm sügavused, 40 cm läbimõõduga ja ümbritsetud graniitkividega (Kiudsoo 2009, 98). Kollete ümbruses oli palju tugevalt põlenud lubjakivipurdu, mille alusel oletati, et ahjude seinad olid laotud paekivist (*ibid.*). Saula rauasulatuskoha puhul viitab autor ka vitskonstruktsioonide kasutamisele ahjuseintes (Kiudsoo 2017, 89). Jüri Peets on oletanud, et Palasi rauasulatuskohas võidi samuti sellist ahjutüüpi kasutada (Peets 2003, 128). Šlakiauguga ahju tööpõhimõte seisneb selles, et šlakki ei lasta ahjust välja, vaid kogutakse ahju põhjas olevasse suurde auku, mille tulemusel moodustub protsessi lõpuks suur šlakikook (Pleiner 2000, 149). Selleks, et moodustuv raud koos räbuga kohe süvendisse ei vajuks, täideti see kuni tavalise ahjupõhja tasemeni kas puusõe, kuivade puude või õletuttidega, mis võimaldasid esialgu šlakil auku voolata. Seeläbi süttis täitematerjal, mis viimaks ära põles ja järele jäi tühimik, kuhu sai voolata vedel šlakk. (*ibid.*)

3.2.2.2. Maagi eeltöötlemine

Eesti rauasulatuskohtadest on leitud nii toorest kui ka juba röstitud rauamaaki (nt Jegorov *et al.* 2023, 113; Unt *et al.* 2023, 101), kuid puuduvad tõendid teistest võimalikest maagiga tehtud toimingutest. Kõlab usutavalt, et enne kasutamist on maaki pinnasejääkidest puhastatud, mille heaks näiteks on Lieporiai rauasulatuskoht Leedus, kust on leitud nii rikastatud kui ka rikastamata maaki, selle peenestamiseks ja pesemiseks kasutatud varustust ning maagi röstimisauke (Salatkienė 2008, 61). Lieporiai kompleks on andnud uurijatele hulganisti olulist teavet, mis aitab paremini konstrueerida ja mõista muistset rauasulatust. Seal on rauamaaki enne rikastamist hoolikalt pestud ning selleks on vaja läinud erilist varustust: ämbritega kaeve, põrandat ning süvendit äravooluvee kogumiseks. Maagi pesemine on tõenäoliselt toimunud järgnevalt: kogutud maak valati süvendi nõlvale laotud sillutisele, mis oli kaldega süvendi

⁵¹ Kiudsoo, M. 2023. Mitmekihiline Varbola: rauasulatuskohast “taanlaste” linnuseks. Ettekanne ajalookonverentsil “Eesti 1200: oma või võõras” 5. novembril 2023 Eesti Ajaloomuuseumis. Ettekande järelvaatamise link on kasutatud veebiallikate loendis.

põhja poole, ning valati üle veega, mida ammutati kaevudest pärnakoorest ämbritega; voolav vesi uhtus maagist välja liiva ning muud ebapuhtused, mis kogunevad koos äravooluveega süvendi põhja. (*ibid.*)

Enne ahju panemist on vaja maaki tules kuumutada ehk röstida. Seeläbi eraldatakse maagist kristalliseerunud vesi ja muud orgaanilised lisandid ning maak redutseerub osaliselt. Röstimine on vajalik etapp rauasulatusahjus kuluva energia säästmiseks. (Peets 2003, 44) Maagi röstimisel toimuv keemiline reaktsioon näeb valemina välja järgnevalt (Pleiner 2000, 108):



Maaki võib röstida lihtsalt lõkkes ja pole niivõrd tähtis, mis konstruktsiooniga on lõke (Lisad, foto 26). Oluline on, et maak oleks tules ja ei vajuks kohe kolde põhja. Nii on hea röstida tahkeid maake, mõnevõrra keerulisem oli 2023. aasta Rookse eksperimendil kasutatud vedela *lögamaagiga*, mis tõsteti ühes plekkämbriga tulle. See sundis mõtlema, kas taolist vedelat maaki on muinas- ja keskajal kasutatud. Võidi küll kasutada raudkatlaid või savianumaid vedela massi hoidmiseks, kuid arheoloogilised andmed seda tuvastada ei võimalda. Allakirjutanu näeb teise lahendusena, et kogutud roostesegune muda tuleb laiali laotada, lasta ära kuivada ning püüda seejärel suuremate tükkidena lõkkesse lisada. Vedelal kujul ämbri röstides muutus maak pulbriks, mis võib olla ahju lisamiseks liiga peene fraktsiooniga – maagiosakesed võivad söe vahelt liiga kiiresti koldepõhja pudeneda, jäädes rauaks taandamata. Katsetel on jälgitud, et ahju pandavad maagiosakesed ei oleks läbimõõdus suuremad kui söeosakesed. Ennemini võib maak olla pigem peenem kui jämedam, kuid Rookse mudast saadud pulbermaagist võiks see siiski natuke jämedam olla.

Röstitud maaki võib vaja olla enne sulatust veel peenestada. Seda saab teha käsitsi, kuigi tõhusam on kasutada sepavasarat. Eestist ei ole leitud konkreetseid maagi peenestamisega seotud tööriistu, kuid mitmest Leedu rauasulatuskohast on leitud kive, mida on tõlgendatud kui maagi peenestamiseks kasutatud tööriistu (Salatkienė 2008, 71).

3.2.2.3. Väliääsi ehitamine

Väliääs on käepärastest vahenditest ehitatud lihtsa konstruktsiooniga ääs toorraua korduvaks kuumutamiseks peale sulatusprotsessi lõppu. Mitmest Eesti rauasulatuspaigast on leitud lohkaaside jäänuseid, mille puhul on nende konstruktsiooni kõrval oluline ka paiknemine ahju suhtes. Jüri Peetsi välitöödel Tuiu Rauasaatmemägedes leiti kaevandist A1 kahe

rauasulatusahju ja nende läheduses paiknenud kahe väliääsi jäänused (Peets 2003, 106–109). Ääsid olid ehituslikult sama tüüpi ja sarnaste mõõtmetega: ääsiseinte rajamisel kasutati graniitkive ja savi, seinad olid 20–25 cm paksused ja 35 cm kõrguselt säilinud, üks ääsi oli tõenäoliselt laotud lahtistest kividest, ääsi oli saviga vooderdatud ja 25 cm läbimõõduga (*ibid.*, 128). Arvestades ääse ümbritsenud punaseks põlenud liiva oli kogu rajatise ligikaudseks läbimõõduks 85 cm (*ibid.*, 108). Ääside jäänuseid leiti Tuius ka kaevanditest A3, B3 ja B4 (*ibid.*, 128). Tõeliselt ilmekas näide ahju, ääsi ja alasikivi paiknemisest on Tuiu kaevandist B3, kus nimetatud atribuudid paiknevad ligi meetriste vahedega samas järjestuses rivistikku (*ibid.*, 118, joon. 58).

Mandril on lohkääse teada Tarumaa rauasulatuskohast Ida-Virumaal ja Tõdva rauasulatuskohast Harjumaal. Tarumaa ääs oli ehitatud 95–100 cm läbimõõduga lohku, ääsi sisediaameter oli 32–35 cm ja sügavus 15–20 cm, sellest olid säilinud vaid tugevalt põlenud savist põhi ja *in situ* klaasistunud esisein, milles oli nelinurkne avaus õhutussüüsi jaoks (Peets 2003, 95–97). Tõdva rauasulatuskohast on leitud kolm väliääsidenäidet tõlgendatud lohku: need olid ligi 40–50 cm sügavused, umbes 40 × 50 cm suurused ja enam-vähem nelinurkse kujuga. Ääside põhjad ja kolm külge olid laotud lamedatest paekiviplaadidest ja väiksematest kivimunakatest. Iga ääsi vahetus läheduses oli ligi 25 cm läbimõõduga postiauk, mida tõlgendati alasipaku asukohana. (Kiudsoo 2009, 98)

Ka eksperimentidel rajatud lohkääsid on enam-vähem sarnaste mõõtmetega nagu arheoloogilised leiudki (Lisad, foto 28). Sügavuse poolest sarnanevad eksperimentaalääsid rohkem Tarumaa ja Tuiu kui Tõdva ääsidega. Ragnar Saage katsetel oleme ümbritsenud kaevatud augu maakividega ja vooderdanud ääsi põhja ning kivide vahed saviga. Õhutussüüsinäidet oleme kasutanud lühikest raudtoru. Nagu näitab Tarumaalt leitud ääsidein, kasutati ka ääsidele õhu juhtumisel tõenäoliselt savist süüsi (Peets 2003, 95).

3.2.3. Raua sulatamine

3.2.3.1. Maagi ja söe lisamine

Rauasulatuse alguseks peaks ahi olema piisavalt vabas õhus kuivanud, et edasise kuumutamise käigus selle seintesse mõrad ei tekiks. Selle vältimiseks tuleb ka kuumuse tõstmisel olla ettevaatlik ja võtta selleks aega. Ragnar Saage katsetel tehakse enne sulatuse algust koldesse kuivade puudega tuli ja lastakse sel mõnda aega rahulikult põleda. Ahjuseinte kuivust on võimalik märgata nende pealispinnast, mis kuivades õige pisut värvi muudavad. Kui ahi paistab

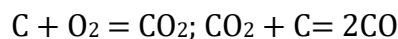
piisavalt kuiv olevat, lisatakse koldetulele järk-järgult sütt juurde ja pumbatakse lõõtsa(de)ga õhku, et kuumust tõsta. Seda tehakse senikaua, kuni ahi on suudmeni söega täidetud ja see on süttinud (Lisad, foto 29).

Järgnevalt võib ahju lisada esimese maagikoguse. Nagu ülalpool on välja toodud, on kasutatud eksperimentidel erinevaid lähenemisviise. Arvi Lauringson on 1978. aasta laborikatses ladestanud söe, maagi ja rübusti koldesse kihiti nagu on näha jooniselt 29, söe ja maagi kaaluline vahekord oli 1:1 (Lauringson 1978, 29). Kuigi kihiline komponentide lisamine on hea, ei õnnestunud Lauringsonil raua toota ka juba seepärast, et ahi süüdati alles peale kolde täitmist (Lauringson 1995, 17). See tähendab, et madalamal paiknevatel maagikihtidel on vähem aega vingugaasi toimel taandumiseks kui kõrgemal paiknevatel kihtidel. Allakirjutanu arvates on vajalik, et iga maagikiht teeks läbi teekonna ahjusuudmest kuni koldepõhjani, et raud jõuaks maagist korralikult taanduda. Jüri Peets täitis küll ahju kogu ulatuses puusöega, kuid lisas seejärel kogu kasutatava maagi ühe korruga (Unt *et al.* 2023, 104). Allakirjutanu hinnangul on selline maagikiht liiga paks, et taandamiseks vajalik vingugaas sellest läbi tungida suudaks. Nii jääb osa maaki, mis vingugaasiga piisavat kontakti ei saa, rauaks taandamata ja see kas põleb ära või läheb taandamata kujul ahju põhjas oleva šlaki koosseisu.

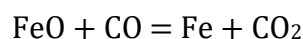
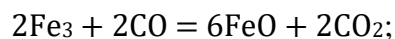
3.2.3.2. Ahjus toimuvad protsessid

Sellisel moel raua sulatamist nimetatakse otsetaandamiseks. See tähendab, et maagist taandatakse kohe metalliline, sepistamiskõlblik raud. Võrdluseks võib tuua kaudse taandamise kõrgahjudes, mille esmaseks toodanguks on malm, millest tehakse omakorda koldetules oksüdeerimisel madala C-sisaldusega raud (Buchwald 2008, 228). Jüri Peets (2003, 44) on otsetaandamisel ahjus toimuvad keemilised protsessid jaganud kolmeks:

1. Söe põlemine ja redutseeriva süsinikmonooksiidi ehk vingugaasi (CO) tekkimine:



2. Rauamaagi redutseerimine ehk taandamine vingugaasi toimel:



3. Šlaki moodustumine:

$\text{SiO}_2 + 2\text{FeO} = 2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (fajaliit), milles on lahustunud FeO (vüstiit), mõnikord ka

$\text{CaAl}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (anordiit), mis tekib savi mineraalidest

On ilmne, et muistsed rauatootjad teadsid, mida tuleb teha selleks, et maagist rauda saada, teadmata midagi keemilistest valemitest. Nii on ka rauasulatuskatsetel hakatud lähtuma üha enam katseosaliste kogemustest ja intuitsioonist.

3.2.3.3. Šlaki väljalaskmine

Sulatuse käigus täitub ahjupõhi ajapikku vedela šlakiga, mis on ühest küljest vajalik, et rauaosakesed saaksid üheks suureks kogumiks ühineda, kuid see ei tohi liiga kõrgele tõusta. Kui vedel šlakk jõuab õhutuskanalini, hakkab see takistama lõõtsast pumbatava õhu sissevoolu. Sellest, et šlakk on ummistanud õhutuskanaleid ka muinas- ja keskajal, annavad tunnistust torukujulised šlakikorgid näiteks Tindimurru, Tuiu ja Punikvere rauasulatuskohtadel (Peets 2003, 77, joon. 26). Eksperimentidel on lõõtsutaja esimene, kes kuuleb ja tunneb füüsiliselt, kui õhk enam vabalt ahju ei pääse. Sel juhul tuleb osa šlakki ahjust välja lasta ning selleks kasutatakse šlaki väljalaskeavasid. Tuiu-tüüpi ahjul paiknevad šlaki väljalaskeavad kahel pool õhutusdüüsi (*ibid.*, 127). Tuiu-tüüpi ahjuga tehtud eksperimentidel on juhtunud, et šlaki väljalaskeavad tehaks erinevatele kõrgustele – see võimaldab šlaki taset ahjus hõlpsamalt reguleerida. Madalamal asetsevat ava kasutatakse katsetel vaid sulatuse lõppjärgus enne raua väljavõtmist, et võimalikult palju šlakki koldest väljutada. Protsessi käigus kasutatakse aga kõrgemal asetsevat avaust. Selleks võetakse seinast välja augu ees olnud puupulk, viimane paari sentimeetri paksune ahju sisesein augu kohal lüüakse katki rauast vardaga (Lisad, foto 30). Eestist puuduvad raua tootmisprotsessil kasutatavad arheoloogilised abivahendid – peale Tuiu vasara (*ibid.*, 162) – kuid näiteks Lõuna-Norrast on leitud rauast konksukujuline ese, mida võidi kasutada õhutusdüüsi puhastamiseks ja šlaki väljalaskmiseks (Rundberget 2017, 116).

Tööruumi suurendamiseks on šlaki kogumiseks kaevatud väljalaskeavade ette pikemad kanalid, milles seistes on mugav ka vajadusel läbi õhutusdüüsi ahjus toimuvat kontrollida. Siiski on oluline panna tähele, ega kanalisse astudes seal juba kuuma šlakki ees ei ole. Samuti ei tohiks kanalisse seista hetkel, kui sinna šlakki lastakse. Katsetel on olnud olukordi, kus šlaki väljalaskja lööb vardaga õhutusava lahti ja samal hetkel pumpab lõõtsutaja õhku – koldes tekib surve ja väljalaskeava kaudu võib hõõguv šlakk suurel kiirusel välja purskuda. Šlakki on välja lastud piisavalt, kui õhu pumpamisel hakkab räbu väljalaskeavast tuld ja sädemeid lenduma. Seejärel voolitakse savist ja põhust väike tomp, millega lahtine šlakkiauk suletakse. Seejärel jätkub töö endistviisi, kuni tekib taas vajadus kas osa šlakist välja lasta või raud välja võtta.

Sulatusprotsessi kestus sõltub kasutada oleva tooraine kogusest – kui kauaks jätkub maaki ja sütt. Seega ei ole kindlat reeglit, kui kaua peaks üks tsüklil kestma. Ragnar Saage katsed kestavad enamasti 4–7 tundi, mis on täiesti mõistlik arvestades katseosaliste võimeid ja jaksu. Oluline on ka arvestada, et sütt peab jätkuma ka toorraua esmaseks sepistamiseks.

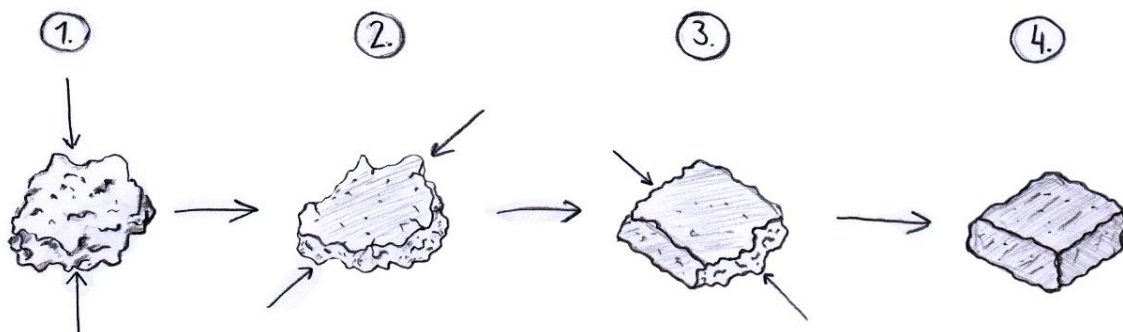
3.2.3.4. Raua väljavõtmine ja esmane sepistamine

Peale sulatusprotsessi lõppu on aeg raud ahjust välja võtta. Selleks ajaks peaks ahi olema söest peaaegu tühjaks põletatud, sest nagu näitas 2021. aasta Saula eksperiment, on raua ahjust väljavõtmisel väga raske ahjus orienteeruda ja raua kätte saada, kui ülalt sütt juurde pudeneb. Tegemist on väga ajakriitilise tööetapiga, kuna ahju põhjas lebab toorraud hakkab lõõtsatöö lakkamisel ja viimase söe eemaldamisel jahtuma. Seda saab küll hiljem ääsis üles kuumutada, aga ainult väliselt – mõistlikum on kasutada ära võimalust, kuni rauapätsi tuum on veel hõõgvel.

Raua kättesaamise viis sõltub suuresti sulatajate edasistest plaanidest kasutatud ahjuga. Oma katsetel oleme harjunud kasutama ühte ahju vaid korra ning seega ei ole ahjusuu avaramaks lõhkumine või ahju sootuks ümber lükkamine oluliseks takistuseks. Ent kui soovida kasutada ahju ka edaspidi, on kasulikum püüda seda võimalikult vähe rikkuda. Ilma koldeseinu kahjustamata ei ole võimalik raua kätte saada – kui läheneda sellele ahjusuudme kaudu, on sealt väljuv õhk endiselt liiga kuum, et käsi pikemalt selle kohal hoida. Ilmselt on raua ahjust eemaldamise tarbeks kasutatud õhutusdüüse, mis ahjuseina müüritakse. Kuna düüs lisatakse ahjuseina eraldi elemendina ja selle koostis ei tarvitse ahju omaga täielikult kattuda, on seda kergem seinast eemaldada, jättes järele avause, mida saab vajadusel laiendada. Selle ava kaudu oleme oma katsetel raua peaaegu alati kätte saanud (Lisad, foto 31). Erandina on paaril katsel tulnud ahi kummuli lükata⁵². Vajamineva tööruumi suurus sõltub, kui hõlpsalt raud ahju põhja küljest lahti tuleb. See sõltub ka koldesse jäänud šlaki kogusest, mille seest tuleb raud üles leida. Eksperimentidel kogetu põhjal nähtub, et šlakk jahtub rauast kiiremini, muutudes tuhmimaks, samas kui kuum raud jätkuvalt oranžikas-kollaselt hõõgub. 2021. aasta Saula eksperiment näitas, et ahju põhja asetatud lame maakivi ei tee raua kättesaamist lihtsamaks, vaid võib anda hoopis vastupidise efekti: vedel šlakk tungib mitte-plastilise kivi õnarustesse nagu ka käsna raua pooridesse, jäädes jahtudes kahe materjali vahele justkui liim.

⁵² Ragnar Saage suuline teade.

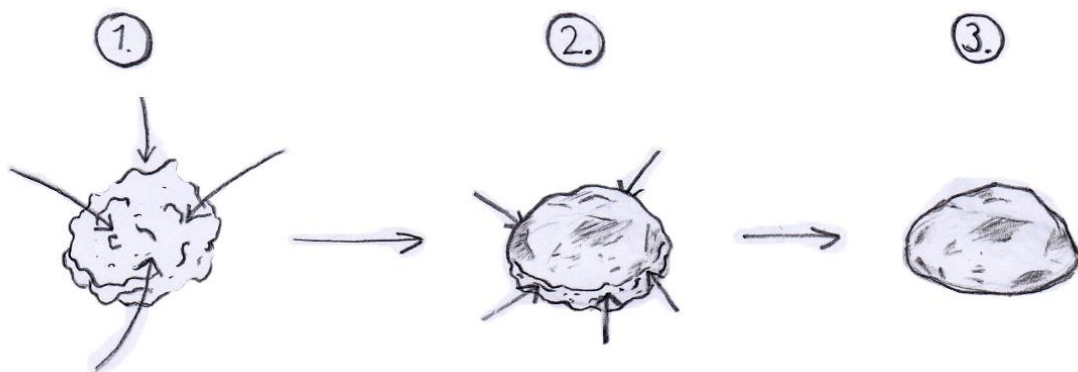
Kui šlakine rauakämp viimaks ahjust välja võetakse, on tähtis kiire tegutsemine. Samal ajal peaks juba väliääsis söed hõõguma, et raua jahtudes seda korduvalt üles kuumutada. Raua esimene sepistamine on oluline selleks, et tooriku makrostruktuuri tihendada ning vabastada see üleliigsest šlakist ja sulasavist. Eestist leitud kaubaraua toorikud annavad aimu, milline kuju on rauale peale sulatust antud, sest nagu siinkirjutaja ja tema juhendaja on nõustunud, kujutab üks kaubatoorik ühe eduka rauasulatuse tulemit (Saage ja Oks, ilmumas). Valdavalt on meie kaubatoorikud nelinurkse kujuga ja see näib olevat kõige loomulikum kujund, mille vormi hakkab käsnaud vasara ja alasi vahel iseenesest võtma (joonis 32). Kui asetada poorne käsnaud alasile ja seda pealt vasardada, muutuvad surve mõjul lamedaks nii alasi-poolne kui ka vasardatav külge. Kuna servad on jätkuvalt konarlikud, keeratakse rauapäts serva peale ning taaskord lamenevad samal moel kaks vastandkülge. Kui korrata sama protsessi veel viimase kahe konarliku otsaga on rauatoorik võtnud juba risttahuka-kujulise põhiilme.



Joonis 32. Poorse käsnauda sepistamine risttahuka-kujuliseks kaubatoorikuks. Autori käsijoonis.

Risttahuka-kujulised rauatoorikud on Eesti arheoloogilises leiuvaines kõige arvukamad, kuid nende kõrval esineb ka mitmeid erivorme. Alulinnast Ida-Virumaal on leitud kaks kerakujulist rauakangi (joonis 2: 3), Sürgaverest Viljandimaal pärineb aga suur rauakamak (joonis 2: 4), mis näib moodustavat kolmandiku kunagisest suurest rauapätsist (Saage *et al.* 2025). Siinkirjutajale tundub siiski ebatõenäoline, et kõnealune toorik oluks omal ajal kaks korda suurem – see kaalub 3,4 kg, mis teeks kujutletava hiigeltooriku kogukaaluks ligi 10 kg. Teisalt ei tundu rauapätsi jagamine sektoriteks kuigi mõistlikuna, et toorikust sepistamiseks vajaliku tükki võtta – mugavam ja tõenäolisem oleks raiuda pätsi küljest lahti mõni nurk, antud juhul kaks nurka. Lisaks eelpooltoodule on Praaga külast Tartumaal leitud kolm poolsfäärilist rauatoorikut (joonis 2: 2) (*ibid.*, 7), mille sarnane õnnestus toota Rookse külas tehtud katsel 2023. aastal (Oks 2023, 30–31; Lisad, foto 33). Praaga toorikud kaaluvad 3–4,3 kg. Võrreldes erinevate Tartu ülikooli arheoloogialaborist läbi käinud rauatoorikute kaalusid ilmneb huvitav

statistiline eripära: poolsfäärilised rauatoorikud kaaluvad üldjuhul rohkem kui risttahuka-
 kujulised. See kaaluerinevus võib seletada poolsfääriliste toorikute kuju (Saage ja Oks,
 ilmumas). Allakirjutanu jälgis ja dokumenteeris Rookse eksperimendi käigus valminud
 rauapätsi sepistamist ja tegi sellest mõned tähelepanekud. Rookse rauale poolsfäärilise ilme
 andmine ei olnud kollektiivne otsus, vaid see lihtsalt kujunes nii ja siin võis mängida olulist
 rolli rauapätsi mass. Kõnealune rauakamakas kaalus sepistamise lõpuks 5,2 kg ja seda oli
 pihtide vahel väga raske hoida, veel raskem oli seda peale äärist võtmist küljelt küljele keerata,
 et püüda pätsile risttahuka kuju anda (*ibid.*). Ainsa lahendusena raua küllaldaseks
 tihendamiseks nähti seda pealmiselt küljelt igast suunast vasardada (joonis 33). Sama tehti ka
 vastanduva küljega, külje pealt vasarahoope andes tihendati ka konarlikud servad. Selle
 tulemuseks oligi poolsfääriline toorik, mis sarnanes väga Praagast leitud toorikutele (Lisad,
 foto 33).



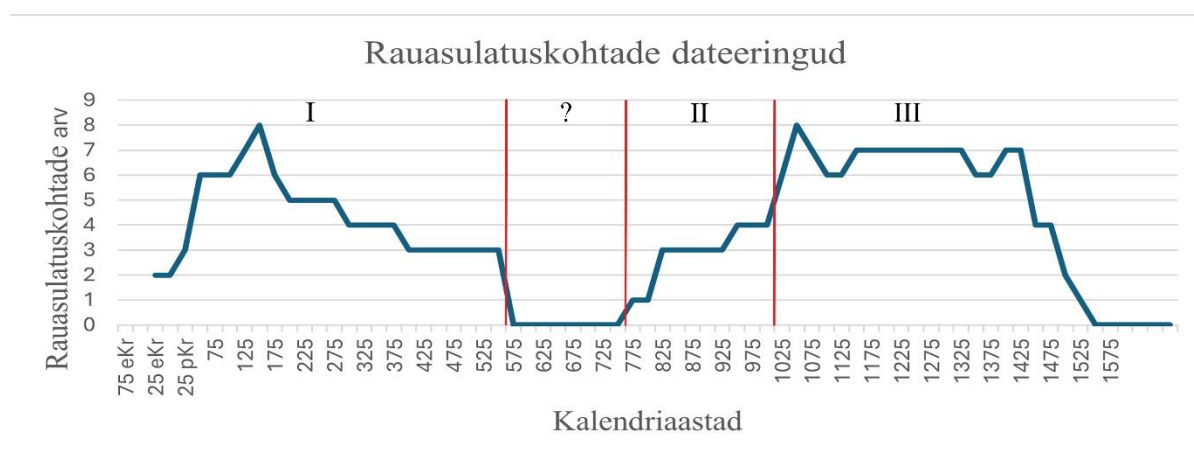
Joonis 33. Poorse käsna raua sepistamine poolsfääriliseks kaubatoorikuks.

Ühtegi teist kuju ei ole eksperimentidel toodetud rauale antud ning seetõttu jääb ka küritavaks, miks on Alulinna kaubatoorikud kerakujulised. Jääb loota, et tulevased katsed annavad ka sellele küsimusele vastuse.

4. Süntees

4.1. Rauasulatuskohad ajas ja ruumis

Rauasulatuskohtade ruumilise leviku eripäradest saame paremini aimu, kui jagada nende ajaline levik dateeringute põhjal eri perioodidesse. Käesoleva töö andmestiku põhjal koostati uus rauasulatuskohtade ajalise jaotumuse graafik (joonis 34), mille põhjal on eristatavad kolm perioodi. Selline jaotus on autori poolt juba varem publitseeritud (Oks 2024), kuid siinkohal on perioodide dateeringuid ja kaasatud objektide arvu mõnevõrra muudetud. Töös kajastuvatest objektidest (Lisad, tabel 1) on graafiku koostamisel kasutatud vaid neid rauasulatuskohti, millest on tehtud radiosüsiniku dateeringud või mis on ajaldatud kaasnevate leidude põhjal mingisse kindlasse perioodi nagu näiteks Olustvere (Lisad, tabel 1: nr 110), Siksälä (nr 153) ja Kalatsova (nr 152), mis pärinevad keraamika põhjal 1.–5. sajandist.

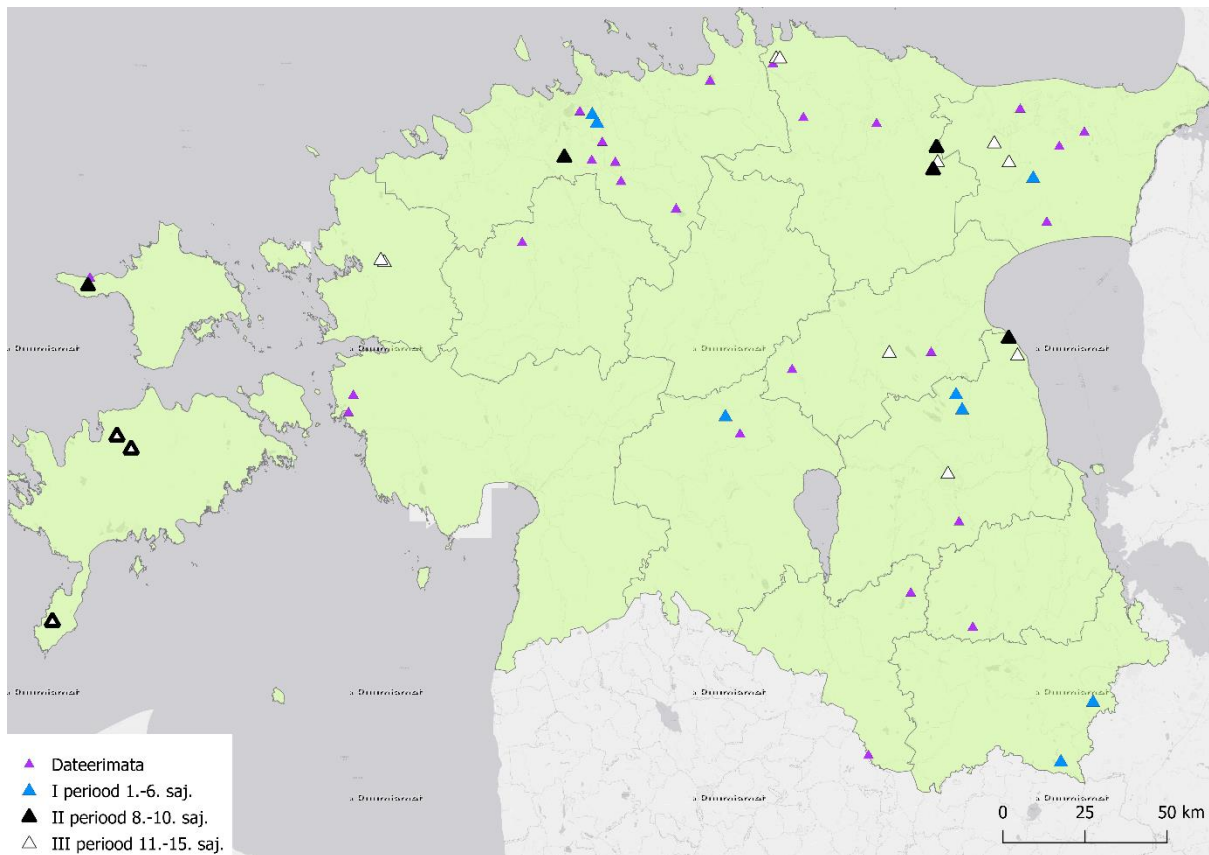


Joonis 34. Eesti dateeritud rauasulatuskohtade ajaline jaotumus.

I periood hõlmab kõige varasemaid kindlaid rauasulatuskohti, mis on dateeritud 1. sajandisse eKr, kui rauasulatus tehnoloogia alles Eestisse jõudis, kuni 6. sajandini pKr (k.a), millele järgneb ligi kaheksa aasta pikkune lünk rauasulatuskohtade aegreas. Nagu näha kaardilt (joonis 35) asuvad kõige varasemad rauasulatuskohad juba neis piirkonnas, kus ka hilisematel perioodidel on toimunud ulatuslik raua tootmine. Esile kerkivad Harjumaa, Kirde-Eesti, Ida-Eesti, Põhja-Viljandimaa ja Kagu-Eesti.

II periood algab 8. sajandiga, mil arheoloogilisse ainesesse lisanduvad uued tootmiskohad ja nende arv tõuseb aeglaselt kuni 10. sajandini (k.a). Uusi tootmiskohti lisandub Harju- ja Virumaale, Peipsi rannikule ja algab rauasulatus Lääne-Eesti saartel (joonis 35). Rauasulatuskohtade arvu tõus sel perioodil on seostatav viikingite mereretkede ja elavnenu

kaubasidemetega (Mägi 2017, 354–359). Kuigi veel 2003. aastal nimetas Jüri Peets Eesti viikingiaega rauasulatuse osas „leiutühjadeks sajanditeks“ (Peets 2003, 82), on viimase kahekümne aastaga lisandunud mitmeid objekte, mille radiosüsiniku dateeringud langevad just sellesse aega (nt Tõdva, Rihula, Kõpu, Iide).



Joonis 35. Rauasulatuskohtade ajaline ja ruumiline levik Eestis.

III periood saab alguse 11. sajandil, kui rauasulatuskohtade arv järsult kasvab, saavutades haripunkti, mida võib pidada Eesti kohaliku rauametallurgia kõrgajaks. See kestab kuni 15. sajandini (k.a), mil kohalik rauatootmine kogu Eestis hääbus. Sel perioodil jätkub raua tootmine Saaremaal Iides, Tuius ja Tõrisel, uusi sulatuskohti lisandub põhjarannikule, Virumaale, Ida-Eestisse ja Läänemaale (joonis 35). Eriliselt kerkivadki sel perioodil esile Saaremaa, Virumaa ja Ida-Eesti (Peets 2003, 84), kus toodetud raua kogumahtu 12.–14. sajandil on Jüri Peets hinnanud 3000–4000 tonnini (*ibid.*, 135). Uuemate arvutuste põhjal võiks selle koguse vähendada 1700–2300 tonnile, ent sellegipoolest on rauasulatuskohtades säilinud rübukuhjad tunnistajaiks omaaegse tootmistegevuse peaaegu tööstuslikele mõõtmetele (Saage *et al.* ilmumisel, 5) Kohaliku rauatootmise intensiivistumine 11. ja eriti 12. sajandil on seostatav suurenenud rauatarbega Baltimaade ristsõja eel, tõenäoliselt vajadusega toota rohkem relvi. Võõrvõimu kehtestamine 13. sajandil on samuti soodustanud kohalikku

rauatootmist: rajatavates linnades vajati rauda rohkelt tööriistade ja muude ehitusvahendite valmistamiseks (*ibid.*, 34). Kohaliku rauatootmise lõppemine 15. sajandi jooksul on seostatav Rootsi importraua *osmundi* turule ilmumisega, mis ajapikku siinse toodangu konkurentsivõimetuks tegi (*ibid.*, 35).

Jätkuvalt on hulganisti dateerimata rauasulatuskohti, mis sobituvad enamasti juba varem välja kujunenud ruumilisse levikumustrisse, kuid täidavad ka tühjemaid piirkondi Lääne-, Kesk- ja Kagu-Eestis (joonis 35). Iseäranis võib radiosüsiniku dateeringute vähesust märgata vanimate, I perioodi rauasulatuskohtade puhul, kus mitmed objektid (nt Siksälä, Kalatsova, Olustvere) on dateeritud I aastatuhande I poolde teiste kaasnevate leidude, näiteks keraamika põhjal. Küsimusi tekitab ka asjaolu, et 7.–8. sajandi esimesest veerandist rauatootmiskohtade dateeringud praktiliselt puuduvad (joonis 34; Tvauri 2012, 113). Selle põhjuseks võib olla 536. aastal ilmselt vulkaanipurske tagajärjel alanud kliima äkiline jahenemine ja sellega kaasnenud järsk populatsioonilangus, mis avaldub ka teiste muististe, näiteks kalmete arvukuse vähenemises (*ibid.*, 307–308). Tekib küsimus, kas katkestus kohalikus rauatootmises oli täielik või säilisid tehnoloogia ja teadmised ka raskematel aegadel. Vaadates kaarti (joonis 35) on kindel, et mõningad piirkonnad, nagu Ida-Eesti, Virumaa ja Harjumaa, olid nii enne kui ka peale katkestust tootmiskohtadena kasutusel, viidates populatsiooni püsimisele neis paigus. Sellele küsimusele võimaldaks aga paremini vastata I perioodi lõpu ja II perioodi alguse rauasulatuskohtade põhjalikum arheoloogiline uurimine, mis pööraks tähelepanu tehnoloogilistele detailidele nagu ahjude ehitus, lõõrikute olemasolu, nende parameetrid jne.

4.2. Šlakkide eripärad ja toodangu iseloom

Käesoleva töö teise peatüki eesmärgiks oli vastata küsimusele, kas metallograafilise analüüsi abil on võimalik eristada rauasulatusšlakki sepašlakist, võttes aluseks räu mikrostruktuuride karakteristika. Sellise probleemiasetuse tekitas asjaolu, et paljud Eesti rauatööpaigad on ennatlikult määratud rauasulatuskohtadeks, kuigi neid ei ole arheoloogiliselt uuritud. Et täiemahulised väljakaevamised on ressursikulukad ja destruktiivsed, nähti võimalust muististe liigi määramiseks võimalikult vähese materjali abil. Nagu analüüsist nähtub, on nii rauasulatusšlakil kui ka sepašlakil mitmeid eriomaseid tunnuseid, kuid need ei tarvitse mitte alati selgelt avalduda. Seetõttu on objekte, mille puhul on muistiseliigi määramiseks tarvilikud ka teistsugused andmed ja analüüsid.

Allakirjutanu hinnangul on rauasulatusšlakile omased järgmised tunnused:

- Šlakimaatriksis esinevad eri suuruses **kontsentrilised poorid**, mis viitavad šlaki kunagisele väga vedelale olekule enne hangumist.
- Šlakiproovi ristlõike servaaladel **esineb fajaliit nõeljate laastudena**, mis viitab šlaki kiiremale jahtumisele maapinna ja õhuga kokkupuutel.
- Šlakimaatriksis **võib esineda väiksemaid üksikuid ferriiditerakesi või suuremaid lainjaid kogumeid**, viidates taas nende tekkele vedelas keskkonnas.

Üldiselt on voolanud rauasulatusšlakid pigem homogeenised ja suuremaid muutusi nende koostises esineb pigem harva. Olgu öeldud, et kõiki nimetatud tunnuseid tuleb šlaki määramisel käsitleda ühekorraga ja mitte eraldi. Seega ei ole nõeljate fajaliidilaastude või kontsentriliste pooride leidmisel võimalik määrata proovi kohe sulatusšlakiks ning nende puudumisel sepašlakiks.

Sepašlakile on allakirjutanu hinnangul omased järgmised tunnused:

- **Fajaliit esineb pikkade peenikeste laastudena**, mis võivad šlakisegus suuremate pooride kuju oluliselt muuta.
- **Vüstiit võib täielikult puududa.**
- Šlakisegus **esinevad kvartsiterad**, viidates kvartslüüva kasutamisele rübustina.
- Šlakis **võivad esineda tagilaastud ja -kuulid**, mis võivad olla osaliselt lagunened.
- Šlakis on **tavalisest enam klaasi**, mis tekib ääsiseinte savi ja rübustina lisatud kvartslüüva sulamisel.

Aušra Selskienė on viidanud, et sepašlakid võivad olla nii homo- kui ka heterogeensed sõltuvalt sellest, millisest šlakipätsi osast on proov võetud (Selskienė 2007, 25). Käku proovid ML 157 ja 159 on mõlemad võetud šlakipätside alumisest küljest, millest võib tuleneda ka nende sarnasus – mõlemas proovis puudus vüstiit täielikult. On võimalik, et kuumutatud rauast väljuv šlakk, mis ääsipõhja külge hangus, ei sisaldanudki vüstiiti ja kuna mõlema proovi näol on tegu šlakiga, mis jõudis ääsipõhja võib-olla enne raua survetöötlemise algust, ei olegi sellesse veel raudoksiidi sattunud, seda nii lahustunud kui ka tagiliblede kujul. Selskienė toob sepašlaki eriomadustena välja ka osaliselt lahustunud tagiliblede, nagu oli näha ka Tarvastu proovide ML 161 ja 162 puhul, ning rübustina kasutatud kvartslüüva terakesed, mis olid samuti nähtavad Tarvastu ML 161 proovis. Kõigele vaatamata on siiski kindlam, kui lisaks šlakile on objektidelt kogutud veel teisigi leide, mis võimaldaks muistise liiki kindlamalt määrata. Rõstitud rauamaagi esinemine leiukompleksis võiks kindlalt viidata rauasulatuskohale, kuna sellele

poleks sepikojas rakendust. Sepikojale viitaksid kindlalt tagiliblede ja raudesemete olemasolu, kuigi tagilaaste ja -kuule võib ka rauasulatuskohtades leiduda, sest rauda on sealgi sepistatud. Seega tulekski neid faktoreid vaadelda koos ja mitte eraldi. Laboratoorsetel analüüsidel peaks tähelepanu pöörama ka šlakkide keemilisele koostisele, mida käesolevas töös ei tehtud.

Kohaliku rauatoodangu kvaliteedi ilmestamiseks analüüsiti nii kaubatoorikuid, mis on kohalikku päritolu, kuid ei ole ilma päritoluanalüüsita alati seostatavad mõne kindla tootmispiirkonnaga, ja toorraudu, mis pärinevad kindlatest rauasulatuskohtadest. Kaubatoorikute põhjal võib üldiselt öelda, et toodetud on sepistamiskõlblikku rauda, mis enamikul juhtudel on pehme (Varja ML 28, Praaga ML 19 ja Sürgavere ML 31), kuid võib sageli sisaldada süsinikurikkamaid alasid (Alulinna ML 15, Metsamägara ML 7 ja Ollepa ML 25) või koguni fosforit (Aa ML 27, Alulinna ML 15). Toorraua analüüsi käigus tuvastati P-sisaldus Tindimurru ML 147 toorrauas, ülejäänud neli proovi (Rihula ML 104, 106, 107 ja Tuiu ML 110) sisaldasid palju süsinikku. Malmi leidus üksnes Kõpu ML 134 proovis.

Raua P-sisalduse saab välja arvutada mikrokõvaduse põhjal, kasutades selleks Thiele ja Hošeki loodud valemit (Thiele ja Hošek 2015, 122):

$$P = (-0.919 + (0.0083 \cdot HV)) \pm 0.13$$

Selle valemi kohaselt on Aa küla kaubatooriku ML 27 P-sisaldus kuni 1,26% (248 HV), Patjala proovi ML 148 P-sisaldus kuni 0,47–0,73% (184 HV), Alulinna kaubatooriku ML 15 P-sisaldus kuni 0,47–0,73% (184 HV) ja Tindimurru toorraua ML 147 P-sisaldus 1,25–1,51% (278 HV) Arvestades, et raua P-sisaldus on juba märkimist väärt alates 0,1% juures (*ibid.*, 114), on kohaliku raua P-sisaldus paiguti üsna kõrge.

On enam kui ootuspärane, et omaaegsed rauasulatajad tahtsid toota head, hästi sepistatavat ja pehmet rauda. Niisama usutav on ka see, et mõningate terariistade valmistamiseks läks vaja rohkem terast ja mõnikord ei ole põlatud ka P-sisaldusega rauda. Keskajal on P-rikast rauda kasutatud näiteks terase damaskimisel, millest valmistati erinevaid terariistu (Thiele ja Hošek 2015, 115). Omaaegsed sepad said raua kvaliteeti siiski vaid kätega tunnetada ja neil polnud aimugi keemilistest elementidest. See võimaldas juba käsraua esmasel sepistamisel praakida välja kõvemad rauaosad, mis sisaldavad kas rohkem süsinikku või fosforit – seda tõendavad ka III faasi eksperimendid. Sepistamisel hakkab pehmem raud hõlpsalt kokku, samas kui kõvemad osad, mis paiknevad rauapätsi servaaladel, murduvad sageli lahti. Võimalik, et see on ka üheks põhjuseks, miks rauasulatuskohtadelt leitavad toorrauatükid sageli kumbagi

eelmainitud elementidest rohkelt sisaldavad – kehvema kvaliteediga rauatükid eralduvad ja neile ei pöörata enam tähelepanu (Saage ja Oks, ilmumas).

Jüri Peetsi tehtud metallograafilised analüüsid on tuvastanud kõrge C-sisalduse enamikus Tuiu toorraualeidudest tehtud proovides, mis esinevad nii terase kui ka malmi erivormidena (Peets 2003, 144–145, tabel 7). See paneb mõtlema, kas ei ole Tuius mitte sihilikult terast toodetud. Kohas, kus raua sulatamine toimus 8.–15. sajandil ehk üle poole tuhande aasta järjest, pidid hiljemalt III perioodiks (11.–15. saj.) olema välja kujunenud teatavad standardid, mis hõlmanuks ka raua kvaliteedi ühtlustamist. See tähendaks, et juhuse läbi tekkinud soovimatu kvaliteediga rauda oleks pidanud tekkima pigem vähem kui üldse. Ent selle arutluskäigu tõesuse kontrollimiseks tuleks teha rohkem analüüse Tuiu rauast tehtud sepistest, mille tuvastamiseks tuleks teha omakorda päritolumäärangud. On aga üsna kindel, et Tuiust leitud malmileiud (*ibid.*, tabel 7: 5, 12) on tekkinud juhuslikult, mitte tahtlikult, sest malm ei ole sepistatav (*ibid.* 140).

4.3. Eksperimendid ja reaalsus – tähelepanekuid tulevikuks

Kolmanda peatüki eesmärgiks oli anda ülevaade Eesti rauasulatuseksperimentide ajaloost ning püüda seeläbi konstrueerida taandamisprotsessi kulgu alates toormaterjalide varumisest ja vajalike konstruktsioonide püstitamisest kuni raua sulatamise ja esmase sepistamiseni. Seeläbi soovis autor pöörata tähelepanu eksperimentaalarheoloogia olulisusele möödaniiku uurimisel ja mõtestamisel ning tuua ka uuemad rauasulatuskatsed teaduskirjandusse.

Rauasulatusel kasutatavatest toormaterjalidest on seni põhjalikumalt uuritud rauamaakide keemilist koostist ja hinnatud nende sobivust raua tootmiseks. Ka söest on tehtud mõningaid analüüse (Peets 2003, 39), et tuvastada puuliigid, millest valmistatud sütt on tootmistegevusel kasutatud. Seni on aga puutumata jäetud rauasulatuskohtadel kasutatud savi, mille analüüsimine võiks aidata vastata mitmele olulisele küsimusele. Allakirjutanu hinnangul võib savi ning selle esinemine looduses olla üks aspekte, mis vähemalt osaliselt määrab rauasulatuskohtade paiknemise maastikul. Kindlasti on üheks määravaks faktoriks rauamaagi leiukohad, kuid savi kaalub maagist rohkem ning seda on raskem transportida. Seega võivad tootmistegevuse kohavalikul mängida olulist rolli ka savi leiukohad. Teisalt annaks savi mineraloogiline uurimine teavet võimalike lisandite kohta, millega on ahjuseinte savi omadusi parandatud. Oluline on ka savi vastupidavus kuumusele. Kõik savid ei ole raua sulatamiseks

sobilikud, sest taandamiseks vajaliku temperatuuri juures võivad mõned savid liigselt sulada, mis raskendavad kogu protsessi kulgu.

Praeguseks on enim teaduslikke eksperimente tehtud Tuiu-tüüpi ahjuga, mille kasutamine protsessi paremaks mõistmiseks hakkab tasapisi ammenduma. Ei ole kahtlust, et Eestis on kasutatud ka teistsuguseid ahjutüüpe, mis vääriskid samuti katsete käigus järele proovimist. Iseäranis pakub allakirjutanule huvi nelinurkne palkraketisega ahi ning selle ehituslik rekonstrueerimine. Jüri Peets on Metsküla ja Tindimurru leidude põhjal teinud ahju rekonstruktsioonijoonise (Peets 2003, 70, joon. 19), milles palkraketise ja kuni 3 cm paksuse ahjuseina vaheline ala on täidetud liivaga, kuid allakirjutanule tundub see pisut kaheldavana. Tundub, et ahju vertikaalmõõtmed on rekonstrueeritud sarnase loogika kohaselt nagu Tuiu-tüüpi ahigi, kus ahju kõrguseks on ligi 80 cm ehk üks inimese käe pikkus. Usutavasti ei suuda 3 cm paksuse seinaga ahi ilma välise toetuseta püsti püsida, kuid see väline tugi ei tohi avaldada seintele liigset survet. Selleks tegi autor järgneva arvutuskäigu, mis näitab, kui palju liiva kulub taolise ahjuraketise täitmiseks, kui ahju küljepikkus on 1,5 m, kõrgus 0,8 m ja šahti läbimõõt 0,4 m. Saadud tulemused on esitatud maksimaalselt kahe komakohaga:

1. Esmalt arvutatakse puitraketise ruumala, kasutades risttahuka ruumala valemit, milles V on ruumala, a ja b on küljepikkused ning c kõrgus:

$$V = a \times b \times c$$

$$V = 1,5 \times 1,5 \times 0,8 = \mathbf{1,8 \text{ m}^3}$$

2. Ahjušahti ruumala arvutatakse silindri ruumala valemi abil, milles r on raadius ja h kõrgus:

$$V = \pi \times r^2 \times h$$

$$V = \pi \times 0,2^2 \times 0,8 = 0,10 \text{ m}^3$$

3. Ahjuraketise ruumalast tuleb lahutada šahti ruumala:

$$1,8 - 0,10 = 1,7 \text{ m}^3$$

4. Üks kuupmeeter kuiva liiva kaalub keskmiselt 1,5–1,6 tonni⁵³. Võttes sellest omakorda keskmise kaalu 1,55 tonni, arvutatakse vajamineva liiva kogukaal kasutades võrdekujulist võrrandit, milles väärtus x on vajamineva liiva mass, L on ühe kuupmeetri liiva mass (1550 kg) ja A on täidetava ahjuraketise ruumala (1,7 m³). Kuna 1 m³ liiva

⁵³ URL=<https://karjaar.ee/kasulikku/>. Külastatud 5. mail 2025.

mass on teada, arvutatakse järgnevalt ainult sellele lisanduva liiva mass ($0,7 \text{ m}^3$), mis moodustab ühest kuupmeetrist 70%:

$$x = \frac{L \cdot A}{100\%}$$

$$x = \frac{1550 \text{ kg} \cdot 70\%}{100\%} = 1085 \text{ kg}$$

5. Järgnevalt liidetakse 1 m^3 ja $0,7 \text{ m}^3$ liiva kaalud kokku ning tulemuseks on ahjuraketist täitva kuiva liiva kogukaal:

$$1550 + 1085 = 2635 \text{ kg}$$

Kuiv liiv on ilma sideaineta küllaltki ebastabiilne ning võib ka külgsuunas liikuda, kui sellele piisavalt survet avaldada. Tehtud arvutused panevad mõtlema, milline võib olla sellise koguse liiva mõju savist ahjuseintele, mille paksus on kõigest 3 cm. Tundub ebatõenäoline, et ahjuraketis oleks täidetud ainult liivaga. Hälssi näitel tundub tõenäolisem kasutada selleks mätast (Smith 2004, 192), mis on liivast stabiilsem ja kergem. Samuti aitab šahtitoestuse ladumine kaldega väljapoole vähendada täitematerjali survet ahjuseintele. Selle arvutuskäigu eesmärgiks oli pöörata esmakordselt tähelepanu puitraketisega ahju ehituslikele eripäradele, kuna sellist tüüpi ahjuga ei ole Eestis veel ühtegi katset tehtud. Küll aga on seda tehtud Inglismaal, kus sarnaste mõõtmetega ahi laoti tervenisti mättakihtidest. Ahju keskele lõigati iga kihi lisamisel auk šahti jaoks, mille siseseinad jooksvalt saviga vooderdati.⁵⁴ Allakirjutanu arvates võis ka Metsküla ja Tindimurru ahjude püstitamisel midagi taolist toimuda, mille tulemuseks on kõigest 3 cm paksused ahjuseinajäänused Metskülas (Peets 2003, 53). Ent see küsimus jääb tulevsate eksperimentide vastata.

Lisaks toormaterjalide analüüsimisele ja uute ahjutüüpide katsetamisele oleks vajalik uurida põhjalikumalt ka välistegurite mõju šlaki mikrostruktuurile läbi eksperimentide. Siiani on uuritud ajaloolisi šlakke ja püütud nende abil leida vastuseid tehnoloogilistele küsimustele, ent allakirjutanu hinnangul võivad ka välistegurid avaldada mõju šlaki mikrostruktuurile. Ülalpool sai juba kirjeldatud nõeljate fajaliidilaastude tekkimisele õhu ja maaga kokkupuutel, kuid milline mõju oleks šlakile näiteks vihmasajul, mis kiirendaks oluliselt selle jahtumist?

⁵⁴ Hurstwic – Viking Combat Research. Iron Smelt using Turf-Built Furnace. URL=<https://www.hurstwic.com/history/articles/manufacturing/pix/smelt2019s/index.html>

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli mõista paremini muistset rauatootmist tuginedes uutele uuringutele ja andmetele. See kätkes Eesti rauasulatuskohtade ja nende toodangu ajalist ja ruumilist kaardistamist, teemakohase leiumaterjali metallograafilist analüüsi ja rauasulatuskatsete ning arheoloogiaandmete põhjal kohaliku rauasulatusprotsessi rekonstrueerimist. Töö sissejuhatuses püstitati järgmised uurimisküsimused:

- Milline on rauasulatuskohtade ruumiline ja ajaline levikumuster Eestis?
- Kas šlaki füüsiliste omaduste põhjal on võimalik eristada rauasulatuspaiku sepatööpaikadest? Kui jah, siis kuidas? Kui ei, siis milliseid lisateadmisi on vaja nende eristamiseks?
- Millist rauda tootsid Eesti muistsed rauasulatajad?
- Kuidas aitavad eksperimendid mõista paremini muistset rauasulatusprotsessi?

Esimese peatüki käigus anti ajaline ja ruumiline ülevaade Eesti rauatööpaikadest. 2025. aasta aprillikuu seisuga on Eestis kokku 154 rauatööpaika, neist 53 on rauasulatuskohad, 46 sepikojad ja 55 määramata rauatööpaigad. Rauasulatuskohtade ajalis-ruumilises levikus võib eristada järgnevaid arenguid: I perioodi (1. sajand – 6. sajand) rauasulatuskohad tekivad kohe sellistesse piirkondadesse, kus ka hilisemal ajal on käinud raua tootmine, nagu näiteks Harjumaa, Kirde-, Ida-, Kagu-Eesti ja Põhja-Viljandimaa; 6. sajandi keskpaigast alates ja läbi 7. sajandi puuduvad rauasulatuskohtade dateeringud, mis võivad olla tingitud 6. sajandi kliimakatastroofist ja sellele järgnenud populatsioonilangusest; II perioodil (8.–10. sajand) jätkub raua sulatamine Virumaal, Ida-Eestis ja Harjumaal ning tekivad uued tootmiskompleksid Saaremaal ja Hiiumaal, mis on seostatavad viikingite mereretkede ja elavnenud kaubasuhetega; III perioodil (11.–15. sajand) hoogustub kohalik rauatootmine, töö jätkub Saaremaal, Virumaal ja Ida-Eestis, uued sulatuskohad tekivad Läänemaale; dateeringuta objektid sobituvad hästi varasemasse levikumustrisse, kuid täidavad ka tühje alasid Põhja-, Kesk- ja Kagu-Eestis. Kaubaraua leiud koonduvad peamiselt Virumaale, on ka leide Põhja-Viljandimaalt, Peipsi rannikult ja Põhja-Eestist.

Teises peatükis anti ülevaade rauasulatus- ja sepašlakkidest ja tuvastati mõned eritunnused, mis võimaldavad neid teineteisest eristada. Rauasulatusšlakkidele on omane pigem homogeenne mikrostruktuur, kus esinevad voolanud šlaki puhul nõeljad fajaliidilaastud,

kontsentrilised poorid, dendriitne vüstiit ja lainjad ferriidikogumid. Sepašlakile on omasem pigem heterogeenne mikrostruktuur, kus võib esineda tagilaaste, -kuule ja kvartsiterasid kasutatud rübustist, vüstiit võib täielikult puududa ja esineb rohkem klaasi. Järgnevalt võeti vaatluse alla kuus ebakindla määranguga rauatööpaika, millest neli (Patjala, Kõpu, Mägipe ja Lalli) määrati eelmainitud parameetrite põhjal rauasulatuskohtadeks, ja kaks (Toila ja Patküla) jäeti teabe vähesuse ning šlaki kõikuva iseloomu tõttu määramata. Šlaki parameetreid on võimalik nende määramisel rakendada, kuid objekti liigi(kindluse) määramisel on alati kindlam tugineda ka teistele leidudele, mis võimaldavad objekti kindlamalt määrata. Nii tulevad rauasulatuskoha tuvastamisel abiks rauamaagi esinemine, sepikodade puhul sepistuspraagi ja tagiliblede paralleelne esinemine pinnases. Kohaliku rauatoodangu kvaliteedi iseloomustamiseks analüüsiti viite toorraualeidu kolmelt objektilt ja seitset kaubatoorikut. Analüüsi tulemusel selgus, et Eestis on toodetud enamasti pehmet, sepistamiskõlblikku rauda, mis võib paiguti sisaldada süsinikku ja fosforit. Mõnikord on rauda sattunud liiga palju süsinikku, mis on muutnud selle kas üleeutektoidseks teraseks üle 0,8% C-sisaldusega, või koguni malmiks.

Kolmandas peatükis anti ülevaade Eesti rauasulatuskatsetest alates 1978. aastast kuni 2024. aastani (k.a). 21. sajandi katsete abil rekonstrueeriti rauasulatusprotsess Tuiu-tüüpi ahju põhjal. Esmalt tuleb varuda toormaterjalid, milleks on savi, rauamaak ja puusüsi. Esimesed kaks on loodusest kättesaadavad, kuid sütt tuleb hapnikuvaeses keskkonnas puidust miilida. Savimassist voolitakse vajalikud konstruktsioonid, milleks on ahi ja vajadusel ka lohkääs. Rauamaak tuleb enne sulatust lõkkes röstida, et selle omadused paraneksid. Rauasulatus alguseks peab ahi olema piisavalt kuivanud, et see kuumuse toimel liigselt ei praguneks. Ahjušahti tehakse esmalt puudega tuli ning täidetakse täies ulatuses söega. Kuumust tõstetakse lõõtsade abil ja kui kogu süsi on süttinud, lisatakse esimene õhuke maagikiht sütele. Järgneb maagi ja söe lisamine vaheldumisi võrdsetes kogustes. Vahepeal võib tekkida vajadus ahjust vedelat šlakki välja lasta, mida tehakse šlaki väljalaskeavade kaudu, mis seejärel taas suletakse. Kui maak on otsas, põletatakse ahjušaht söest tühjaks, lastakse välja viimane šlakk ja eemaldatakse õhutyslõõrik. Tekkinud avause kaudu võetakse ahjust välja poorne käsnaud, mis koheselt kompaktsemaks vasardatakse, seda vajadusel väliääsis kuumutades. Sepistamise käigus võtab raud soovitud kuju, mis kaubaraua leidude põhjal on enamasti risttahuka-kujuline või poolsfääriline.

Töö peamiseks väärtuseks on rauasulatuskohtade ja kaubaraua leidude ajakohane kaardistamine, mida pole tehtud viimase 22 aasta jooksul. Teisalt katsetati rauasulatuskohtade

ja sepikodade eristamist šlaki metallograafilise analüüsi läbi, mida pole Eestis veel tehtud. Kolmandaks tehti ülevaade Eesti teaduslike rauasulatuskatsete ajaloost, mis võimaldavad rauasulatusprotsessi rekonstrueerida ja jõuda lähemale mõistmisele, kuidas seda muinas- ja keskajal teha võidi. Oluline on hoida meeles, et eksperimendid näitavad, kuidas midagi teha võidi, ent need ei tarvitse alati tegelikule tõele vastata.

Töö käigus tekkisid ka uued küsimused ja hüpoteesid, mis võivad anda aluse tulevastele uuringutele:

- Kas savi leiukohad on mänginud rolli rauasulatuskohtade ruumilise leviku kujunemisel?
- Milliseid savisid on muinas- ja keskajal raua sulatamisel kasutatud? Milline on nende sulavusaste?
- Kuidas funktsioneeris nelinurkne palkraketisega ahi Metskülas ja Tindimurrul ning kuidas seda rekonstrueerida?
- Milline on välistegurite mõju šlaki mikrostruktuurile selle jahtumisel?

Kasutatud allikad ja kirjandus

Veebiallikad:

Hurstwic – Viking Combat Research. Iron Smelt using Turf-Built Furnace. URL=<https://www.hurstwic.com/history/articles/manufacturing/pix/smelt2019s/index.html>.

Külastatud 6. mail 2025.

Isakar, M. 2011. Eesti maavarad. Mineraalide ja kivimite õppematerjal. URL=sisu.ut.ee/maavarad/. Külastatud 3. märtsil 2025.

Karjäär.ee. URL=<https://karjaar.ee/kasulikku/>. Külastatud 5. mail 2025.

Kiudsoo, M. 2023. Mitmekihiline Varbola: rauasulatuskohast “taanlaste” linnuseks”. – Ettekanne ajalookonverentsil “Eesti 1200: oma või võõras” 5. novembril 2023 Eesti Ajaloomuuseumis. URL=<https://www.youtube.com/watch?v=ximjP6d2ehc>. Külastatud 15. veebruaril 2025.

Kurisoo, T. Leiuatlas. URL=leiuatlas.ee/atlas/. Külastatud 26. jaanuaril 2025.

Käsikirjad:

Aus, T. 1984. Rakvere linnus. Ehitisarheoloogilistel kaevamistel 1983.a. saadud leiuainese analüüs. Köide X. Tallinn. Käsikiri SA Virumaa Muuseumid arhiivis.

Jegorov, S. 2022. Ekspertihinnang Harjumaalt, Lääne-Harju vallast, Meremõisa külast 2022. aasta aprillis saadud leidude kohta. Ekspertihinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Jegorov, S. 2023. Eesti arheoloogilise raua päritoluanalüüs. Magistritöö. Juhendaja: Ragnar Saage. Tartu ülikool. Käsikiri Tartu ülikooli arheoloogia arhiivis.

Kangert, N. ja Kivirüüt, A. 2016. Välitööd Jõgisoo viikingiaegse aarde leiukohal. Aruanne. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Kiudsoo, M. 2017a. Arheoloogilised leiud Mustlast, Järvamaalt. Ekspertihinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Kiudsoo, M. 2017b. Uusi arheoloogiamälestisi Lääne-Virumaalt Vaiatust. Ekspertihinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Kiudsoo, M. 2017c. Rauast kaubatoorikud Ida-Virumaalt, Vooreperast. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Kiudsoo, M. 2017d. Kaubatoorikute peitvara Ida-Virumaalt, Aa külast. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Kiudsoo, M. 2018a. Rauast kaubatoorikute peitvara Varjast, Ida-Virumaalt. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Kiudsoo, M. 2020. Leiud Harjumaalt, Kasepere külast. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Kurm, M.-L. ja Oks, K. koostamisel. Tarvastu ordulinnuse šlaki ja raua metallograafiline analüüs (ML 160–165). Materjaluuuringu aruanne.

Luik, H. 2017. Arvamus XXX ja XXX poolt 2017. aastal Pärnumaalt Tarva külast leitud esemete kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Lutter, G.-K. 2020. Detektorileiud Saaremaalt. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Oks, K. 2022. Tarvastu ordulinnuse sepikoda. Bakalaureusetöö. Juhendaja: Ragnar Saage. Tartu ülikool. Käsikiri Tartu ülikooli arheoloogia arhiivis.

Posti, M.-L. 2018. Ekspert hinnang Virumaalt, Iisaku vallast saadud leidude kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Posti, M.-L. 2021. Ekspert hinnang Harjumaalt, Kose vallast, Tammiku, Kirivalla ja Kuivajõe külast saadud leidude kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Rannaäär, K. 2024. Ekspert hinnang Röpina kihelkonnast ja Setomaa vallast Meerapalu, Saare, Piiri ja Popovitsa küladest 2020. aastal saadud esemetele. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Reppo, M. 2020. Detektorileiud Valasti, Kaaruka ja Allikjärve külast Paide linna halduspiirkonnast Järvamaalt. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Saage, R. 2013. Käku sepikoda: Arheoloogia väljas ja sees. Magistritöö. Juhendajad: Ain Mäesalu ja Jüri Peets. Tartu ülikool. Käsikiri Tartu ülikooli arheoloogia arhiivis.

Siig, K. 2013. Linnuste nihe. Uurimus Eesti linnustevõrgustikus 11. sajandil toimunud muudatusest ning selle ühiskondlikest tagamaadest ja mõjudest. Bakalaureusetöö. Juhendaja: Ain Mäesalu. Tartu ülikool. Käsikiri Tartu ülikooli arheoloogia arhiivis.

Tamla, Ü. 2015. Arvamus Muhu saarel Nurme külas Ristimäe nimelisest kivikalimest avastatud muinasesemete kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Tamla, Ü. 2020. Arvamus Ida-Virumaalt Peeri järve, Mõisamaa, Roodu ja Kohtla küla territooriumile jäävalt kuult katastriüksuselt 2020. a saadud esemete kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Tasuja, K. 2014. Arvamus XXX poolt Piira külast (Vinni vald, Lääne-Virumaa) 2014. aasta aprill-mai leitud esemete kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Tvauri, A. 2017. Ekspert hinnang XXX poolt Viljandi maakonnast Maalasti külast 2017. aastal leitud esemete kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Tvauri, A. 2021. Ekspert hinnang Harju maakonnast, Kuusalu vallast, Valgejõe külast leitud esemete kohta. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Vedru, G. 2014. Ekspert hinnang Lehola külast (Keila vald/Keila kihelkond) Harjumaalt kogutud leidudele. Ekspert hinnang. Käsikiri Muinsuskaitseameti arhiivis.

Publikatsioonid:

Aaloe, A. ja Kustin, A. 1966. Muistne metallurgia Saaremaal. – *Eesti Loodus*, 3, lk 162–164.

Blehner, M. A., Mäesalu, M. ja Saage, R. 2023. Vanad leiud, uued tõlgendused: keskaegne metallitöökompleks Tartus Lossi tänaval. – Taevased ja maised teed. Surmast ja rändest Tartu ajaloo. – *Tartu Linnajaloo Muuseumid. Aastaraamat 2023*, 24 (toim. M. Rennit, A. Haak), lk 85–102. Tartu Linnamuuseum, Tartu.

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

Grewingk, C. 1887. Archäologische Ausflüge in Liv- und Estland. – *Sitzungsberichte der gelehrten estnischen gesellschaft zu Dorpat 1886*, lk 153–177.

Haak, A. 2006. Tartu värava eeslinna tekkest, hävingust ning taaskujunemisest. Uusi andmeid arheoloogilistelt kaevamistelt 1996–2005. – *Viljandi Muuseumi aastaraamat 2005*, lk 68–87. Viljandi.

Jegorov, S., Oks, K., Sikk, K. ja Saage, R. 2023. The iron smelting complex of Rihula. – *Archaeological Fieldwork in Estonia 2022*, lk 107–114.

Jegorov, S., Żabiński, G., Andreassen, R., Birch, T., Somelar, P., Oks, K., Peets, J. ja Saage, R. ilmumas. A Pilot Study of Estonian Archaeological Iron Provenance. – *Journal of Archaeological Science*.

Järvpõld, A. ja Saage, R. 2016. Hoogsalt kerkinud muinastalu ja Rõuge raud. – *Tutulus – Eesti arheoloogia aastakiri*, lk 40–41.

Kiudsoo, M., Mäll, J. ja Kallis, I. 2009. Archaeological excavations on the iron-smelting site in Tõdva village. – *Archaeological Fieldwork in Estonia 2008*, lk 96–101.

Kiudsoo, M. 2016. Viikingiaja aarded Eestist: idateest, rauast ja hõbedast. Imeline Ajalugu.

Kiudsoo, M. 2018b. New archaeological monuments on the upper reaches of the Loobu River, Lääne-Virumaa County. - *Archaeological Fieldwork in Estonia 2017*, lk 79–84.

Kriiska, A., Khrustaleva, I., Niinesalu-Moon, M., Oks, K., Saage, R., Macāne, A. ja Nordqvist, K. ilmumas. Toila Roosimägi: an Iron Age settlement, iron smithing and burial site in northeastern Estonia. – *Muinasaja teadus*, 31.

Krusenberg, E. 1932. „Tulekindlad“ savid Eestis. – *Populaarteaduslik ajakiri Loodudvaatleja*, 2, lk 55–58.

Lauringson, A. 1978. Nagu kaks tuhat aastat tagasi. – *Horisont*, 10, lk 28–30.

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

Lavi, A. ja Peets, J. 1984. Uusi andmeid Eesti muistsest rauametallurgiast. – Kõrgema tehnilise hariduse ja tehnilise mõtte areng Eestis. *Tallinna Polütehnilise Instituudi Toimetised, UDK 378. 662 (474. 2)*, lk 43–48. Tallinn.

Lavi, A. 1999. Põhja-Tartumaa rauatööst muinas- ja varakeskajal. – *Eesti Arheoloogia Ajakiri 1999, 3(1)*, lk 35–62.

- Lõugas, V. 1969.** Kui raud tuli. – *Horisont*, 7, lk 24–28.
- Lõugas, V. 1988.** Loodusteaduslike meetodite kasutamisest Eesti arheoloogias. – *Loodusteaduslikke meetodeid Eesti arheoloogias*, lk 13–25. Tallinn.
- Mandel, M. 2007.** Mida arheoloogid Uuglast leidsid? – *Lääne Elu, teisipäev, 14. august 2007*, lk 5.
- Mandel, M. 2008.** Uugla – kas muistne sepapada? – *Lääne Elu, laupäev, 19. juuli 2008*, lk 10.
- Metsallik, R. 1995.** Tartu arheoloogilisest uurimisest. – Tartu arheoloogiast ja vanemast ehitusloost. *Tartu Ülikooli Arheoloogia Kabineti Toimetised*, 8, lk 15–35. Tartu.
- Mäesalu, A. ja Valk, H. 2006.** Research into the Late Iron Age. – *Archaeological Research in Estonia 1865–2005* (toim. Valter Lang ja Margot Laneman). Estonian Archaeology, 1. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.
- Mägi, M. 2017.** Viikingiaegne Eesti. Maa, asjad ja inimesed ajastu risttuultes. Kirjastus Argo.
- Niinesalu-Moon, M., Randoja, K., Lillak, A., Oras, E., Tõrv, M., Johanson, K., Saage, R., Lucquin, A., Hiie, S., Kriiska, A. ja Lang, V. 2023.** Pre-Roman Iron Age inhumations: a multi-proxy analysis of a burial complex from Tallinn, Estonia. – *Estonian Journal of Archaeology*, 27 (2), lk 129–158.
- Oks, K. 2023.** Edukas rauasulatuskatse Rookse külas. – *Tutulus – Eesti arheoloogia aastakiri*, lk 30–31.
- Oks, K. 2024.** 45 aastat rauasulatuskatseid Eestis: mis, miks ja kuidas? – *Horisont*, 3, lk 48–52.
- 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. 2014.** Raua tootmisest Siksäläs ja mujal Lõuna-Eestis. – *Siksälä kalme I. Muistis ja ajalugu* (toim. H. Valk ja S. Laul). Tartu ülikool, lk 239–244.
- Plado, J., Kiik, K., Jokinen, J. ja Soesoo, A. 2020.** Magnetic anomaly of the Jõhvi iron ore, northeastern Estonia, controlled by subvertical remanent magnetization. – *Estonian Journal of Earth Sciences*, 2020, 69, 4, lk 189–199.

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

Raudmets, O. 1978. Raud kohalikust maagist. – *Horisont*, 4, lk 26–27.

Riikoja, H. 1936. Järvemaagist ja selle esinemisest Eestis. – *Eesti Loodus*, 3, lk 89–96.

Rundberget, B. 2017. Tales of the Iron Bloomery Ironmaking in Southeastern Norway: Foundation of Statehood C. AD 700–1300, 76. Brill.

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

Saage, R. ja Ratas, J. 2017. Kuumad võtted Rõuges. – *Tutulus, Eesti arheoloogia aastakiri*, lk 48–49.

Saage, R. 2018. Smithies and forges around the north-eastern Baltic Sea from the 11th to the 17th century AD. – *The Journal of the Historical Metallurgy Society*, 51 (1), lk 13–21.

Saage, R. ja Järvpõld, A. 2018. Huunide ragomisest ja ravva tsagamisest. – *Tutulus, eesti arheoloogia aastakiri*, lk 60–61.

Saage, R. 2021. Hästi loetud rauasõnad Viikingite külas. – *Tutulus, Eesti arheoloogia aastakiri*, lk 22–23.

Saage, R., Johanson, K., Rannamäe, E, Jegorov, S. ja Haak, A. 2021. The settlement site of Maalasti: crafts from the Mesolithic to the Medieval Times. – *Arhcaeological Fieldwork in Estonia 2021*, lk 65–76.

Saage, R. ja Oks, K. 2024. Rauda sulatades kogutud tarkused. – *Tutulus, Eesti arheoloogia aastakiri*, lk 25–27.

Saage, R., Kama, P ja Tomson, P. 2024. Söepõletus Karulas Kakulaanes. – *Tutulus, Eesti arheoloogia aastakiri*, lk 57.

Saage, R., Mäesalu, M. ja Oks, K. 2025. Iron production and trade in Estonia from the 11th to 16th Century. – *Shipwrecks and The Baltic metal trade - Metal production and trading nodes 13th – 17th century*, Toim. C. Karlsson ja G. Magnusson. Jernkontoret, Stockholm.

Saage, R. ja Oks, K. ilmumas. Blooms and experiments: learning the hard way from iron smelting. – *Conference Proceedings. Archaeometallurgy in Europe 2024 in Falun, Sweden. Subtitle: AiE 11–14 June 2024.* (toim. G. Magnusson, C. Karlsson, E. Hjártner Holdar, A. Giumlia-Mair).

Salatkienė, B. 2008. Iron metallurgy in Lithuania. An analysis of archaeological finds (part 1). – *Archaeologica Baltica*, 9, lk 61–76.

Selskienė, A 2007. Examination of smelting and smithing slags formed in bloomery iron-making process. – *Chemija* 18(2), lk 22–28.

Smith, K. P. 2005. Ore, Fire, Hammer, Sickle: Iron Production in Viking Age and Early Medieval Iceland. – *De Re Metallica: The Uses of Metal in the Middle Ages*, lk 183–204. Routledge.

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

Tvauri, A. 2012. The Migration Period, Pre-Viking Age, and Viking Age in Estonia. Estonian Archaeology, 4. Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus.

Unt, A. Saage, R., Oks, K. ja Peets, J. 2022. Excavations at the Tuiu iron-smelting site, Saaremaa. – *Archaeological Fieldwork in Estonia 2022*, lk 99–106.

Vaikre, E. 2024. Oskaja saab tänagi soomaagist raua kätte ja lõkkel tööriistad valmis taotud. – *Kalale! Looduses*, 49, lk 76–81.

Valk, H. 2023. Archaeological investigations in the western room of the ‘Clergy house’ of the Teutonic Order Castle in Viljandi. – *Archaeological Fieldwork in Estonia 2022*, lk 157–170.

Varep, E. 1970. Rauasulatamiskohti Alutaguses. – *Eesti Loodus*, 1, lk 46–47.

Summary

ANCIENT ESTONIAN IRON PRODUCTION: SITES, YIELDS AND PROCESS

This thesis explores ancient iron production in Estonia based on new research and data. The term "ancient" refers to a period from the Pre-Roman Iron Age to the 15th century. The research addresses several key questions: the spatial and chronological distribution of iron smelting sites and currency blooms in Estonia, the potential to distinguish smelting sites from smithy sites based on slag properties, the quality of iron produced by ancient Estonian smelters, and the insights gained from experimental smelting.

The thesis maps out various ironworking sites across Estonia, categorizing them into smelting sites, blacksmithing sites, and undetermined ironworking sites. By April 2025, 154 ironworking sites have been identified in Estonia, of which 53 are confirmed smelting sites, 46 are smithy sites and 55 are unidentified ironworking sites. Three main production phases were outlined, spanning from the 1st century BC to the 15th century AD. Temporal analysis indicated that iron production activities varied over time, with notable peaks during certain historical periods, reflecting broader changes in the society.

Metallographic analysis helped distinguish smelting slag from smithing slag, with characteristic differences in microstructure. Six uncertain sites were examined, and four were identified as smelting sites (Patjala, Kõpu, Mägipe and Lalli). Two sites (Toila and Patküla) were left unidentified due to the lack of evidence and the variable nature of slag. The quality of ancient Estonian iron was assessed; results show that soft, forgeable iron was most common, though occasionally higher-carbon steel or cast iron was produced. In some cases high phosphorus content was identified by microhardness measurements.

The study offers a comprehensive overview of scientific iron smelting experiments in Estonia from 1978 to 2024. Experimental archaeology played a key role in reconstructing the local smelting process using Tuiu-type furnaces. These experiments demonstrated the importance of managing slag effectively to maintain the high temperatures needed for smelting. The role of different materials, such as the type of charcoal used and the composition of the ore, was also highlighted. The experiments showed that the choice of materials could significantly affect the efficiency of the smelting process and the quality of the produced iron. For example, using

high-quality charcoal and carefully selected ore resulted in a more efficient smelting process and higher-quality iron.

The thesis contributes an updated synthesis of iron smelting in Estonia, the first metallographic comparison of slag types, and new insights into ancient technologies. It also raises questions for future research, such as the role of local clay sources, the function of rectangular timber-curbed furnaces and the effect of non-human factors such as rain on the microstructures of tap slag.

The author acknowledges the support of various institutions and individuals, including the Postimees Fund, the Ministry of Education and Research, and the Estonian Research Council. This support was crucial in enabling the comprehensive research and experimental work that underpins the thesis. The collaboration with experts in archaeology, metallurgy, and experimental archaeology provided valuable insights and guidance throughout the research process.

Overall, the thesis offers a detailed and nuanced understanding of ancient iron production in Estonia, combining archaeological data, metallographic analysis, and experimental archaeology to provide a holistic view of the subject. The findings not only enhance our knowledge of ancient iron smelting techniques but also contribute to broader discussions on the technological and socio-economic developments in ancient Estonia.

LISAD

Lisad: tabel 1

Tabel 1. Rauatööpaigad Eestis. Tabelis on toodud objektide asukohaandmed, nende liik ja selle kindlus, dateeringud ja viited infoallikaile. Samuti märkused ning peanumbrid ülikoolide arheoloogiakogudes ja muuseumites. Viimases tulbas on ka kultuurimälestiste reg. numbrid.

Number	Kihelkond	Asustusüksus	Muistiseliik ja liigikindlus	Dateering	Infoallikas	Märkused	Peanumbrid ja mälestised
Saaremaa							
1	Jämaja	Torgu-Mõisaküla	RSK – K	10.–12. saj	Ragnar Saage suuline teade	Iide rauasulatuskoht. Jüri Peetsi uuringud 2011. aastal. Tln-3481, 983 ± 55 BP, 971–1188 AD	
2	Kaarma	Kuressaare linn	SPK – K	16.–17. saj	Saage 2013, 5; Peets 2003, 179	Kuressaare piiskopilinnuse sepikoda. Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanul puuduvad täpsemad asukohaandmed.	
3	Kaarma	Käku	SPK – K	14.–17. saj	Saage 2013, 16, tabel 1; ARHUT ID 20643	Käku sepikoda.	AI PR 6845
4	Kaarma	Tõrise	RSK – K	10.–14. saj	Peets 2003, 102, tabel 6	Tõrise rauasulatuskoht.	Mälestis 12265

5	Muhu	Nurme	M – O		Tamla 2015	Ekspert hinnangus on kirjutatud: "Ebamäärase kuju ja ebatasaste pindadega soomaagitükk, milles on alles arvestatavas koguses välja sulamata rauda." – leitud kalmest. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
6	Mustjala	Tuiu	RSK – K	8.–15. saj	Peets 2003, 102, tabel 6; ARHUT ID 20972	Tuiu rauasulatuskoht. ARHUT-is on dateering vale (13.–16), algab juba 8. saj ja viimased dateeringud 15. saj	AI PR 4286, 4301, 5446, 6531, 8668; Mälestis 12548
7	Mustjala	Paatsa	SPK – K	11.–14. saj	Peets 2003, 190, tabel 9; ARHUT ID 20644	Paatsa sepikoda.	AI PR 4906, 5983
8	Pöide	Neemi	M – O	KeA, UA (15.–19. saj) (ARHUT)	ARHUT ID 20297	Leitud kolm malmkangi, Ragnar Saage tegi metallograafilise analüüsi ja dateeris KeA/UA.	
9	Pöide	Saareküla	SPK/M – K	KeA, VUA (?) (ARHUT)	ARHUT ID 20304	Rauatükid, tagilibleid. Tõenäoliselt sepikoda, sealt on ka osmund leitud (allakirjutanu info).	
10	Pöide	Kahtla	M – VK		KMR	Leide pole, kuid Kultuurimälestiste registris metallitööpaigana arvel.	Mälestis 12439

11	Pöide	Kahtla	M – VK		KMR	Leide pole, kuid Kultuurimälestiste registris metallitööpaigana arvel.	Mälestis 12438
12	Püha	Kaali	SPK – K	18.–19. saj	Peets 2003, 179; ARHUT ID 20779	Kaali sepikoda.	AI PR 5046; Mälestis 12603
13	Püha	Vaivere	M – O		Lutter, G.–K. 2020	Leitud šlakitükk. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
Hiiumaa							
14	Emmaste	Prassi	SPK/M – K	19.–20. saj	Ragnar Saage suuline teade; KMR	Prassi sepikoda. Ua-86018: 99 ± 25 BP, 1809–1923 AD.	Mälestis 8902
15	Reigi	Mägipe	RSK/M – K		KMR	Mägipe rauasulatuskoht.	Mälestis 8933
16	Reigi	Kõpu	RSK – K	10.–12. saj	Ragnar Saage suuline teade; KMR	Kõpu rauasulatuskoht. Ua-86019: 1008 ± 49 BP, 973–1161 AD.	AI PR 5155; Mälestis 8929
Läänemaa							
17	Lääne-Nigula	Uugla	RSK – K	11.–14. saj	Mandel 2007, 5; ARHUT ID 20629	Uugla rauasulatuskoht.	AM 23375 A 502; Mälestis 10091
18	Lääne-Nigula	Uugla	RSK – K	11.–12. saj	Mandel 2008, 10; ARHUT ID 20584	Uugla II rauasulatuskoht. Mati Mandel oletab sepa elupaika, raua tootmis- ja töötlemiskohta.	AM A 1070

19	Noarootsi	Väike– Nõmmküla	SPK/M – O		ARHUT ID 18936	Mõisa sepikoja ase.	
20	Ridala	Haapsalu linn	SPK – K	14. saj	Saage 2018, 15	Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanul puuduvad täpsemad asukohaandmed.	
21	Vormsi	Hullo	SPK/M – O		ARHUT ID 11916	Töenäoliselt sepikoda.	TÜ PR 1925
Pärnumaa							
22	Hanila	Rame	RSK – K		ARHUT ID 13106	Rame rauasulatukoht. Rauamaagi ja šlaki leiupaik.	AM A 919
23	Hanila	Kõmsi	RSK – K		ARHUT ID 1162	Kõmsi rauasulatukoht.	AM A 926; Mälestis 9868
24	Mihkli	Kurese	M – K		Siig 2013, 104	Soontagana linnus. Linnusest on leitud šlakki ja tiiglikatkeid. Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanul puuduvad täpsemad asukohaandmed.	Mälestis 11763
25	Pärnu–Jaagupi	Metsavere	M – O	NoRAV, NoRAH (10.– 12. saj)	ARHUT ID 20043	Toorraua leiukoht (kaks tükki, 206 g ja 1035 g).	
26	Pärnu–Jaagupi	Tarva	M – O		Luik 2017	Leitud üks väike oletatav šlakitükk, mida ei saa pildi põhjal määrata.	

						Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
27	Vändra	Vilivere	SPK – K		ARHUT ID 14464	Vilivere sepikoda. Leitud šlakki, savitükke ja toorraua kamakas.	AI PR 7259
Raplamaa							
28	Hageri	Angerja	SPK/M – O		ARHUT ID 15448	Kõrval asub Sepa talu.	
29	Hageri	Vilivere	SPK/M – O		ARHUT ID 15706	1930. a pärimus: kellegi isa oli sepp ja miilis ise sütt.	
30	Juuru	Toomja	SPK – K		ARHUT ID 16625	Toomja sepikoda. Liigi(kindluse) määras Mauri Kiudsoo.	AI PR 6929
31	Kullamaa	Maidla	M – O	NoRAH	ARHUT ID 18593	Šlaki ja raudesemete leiupaik. Mati Mandeli arvates võib-olla muistne rauatoomise ja –töötlemise keskus.	
32	Rapla	Linnaaluste	M – K		ARHUT ID 14880	Šlaki leiupaik.	TÜ 882
33	Rapla	Jalase	SPK/M – O		ARHUT ID 14929	EL-is oleva pildi peal kirjas sepikojaase (täpsem viide ARHUT-is)	
34	Rapla	Linnaaluste	SPK – K		ARHUT ID 14705	Leidude põhjal pigem sepikoda. (Liigi(kindluse) määras Jüri Peets.	TÜ 1367

35	Rapla	Lipa	SPK – K	RA	ARHUT ID 11415	Lipa sepikoda.	TÜ 993
36	Rapla	Raka	SPK/M – O		ARHUT ID 15051	Šlaki leiupaik, leitud Sepa talu koplilt – pigem sepikoda.	
37	Rapla	Palamulla	M – K	NoRAH, KeA (12.–14. saj)	ARHUT ID 11754	Šlaki leiupaik.	Mälestis 12192
38	Rapla	Põlli	RSK – K	11.–13. saj (KMR)		Mauri Kiudsoo hinnangul rauasulatuskoht. Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanul puuduvad täpsemad asukohaandmed.	Mälestis 12117
39	Vigala	Vana–Vigala	M – O		ARHUT ID 16536		
Harjumaa							
40	Hageri	Tõdva	RSK – K	9.–11. saj	Kiudsoo 2009, 100; ARHUT ID 15732	Tõdva rauasulatuskoht. Hela-1911, 1085 ± 30 BP, 890–1020 AD cal. 95,4%	AI PR 6870; Mälestis 18927
41	Hageri	Kabila	M – O		ARHUT ID 15284		
42	Haljala	Valgejõe	SPK/M – O		Tvauri 2021; ARHUT ID 19304	Tasakumer šlakipäts, võib–olla sepikoda.	
43	Harju–Jaani	Partsaare	M – O		ARHUT ID 16033	Šlaki leiupaik.	AI PR 3455
44	Harju–Madise	Kasepere	SPK – K	NoRAV, NoRAH	Kiudsoo 2020; ARHUT ID 17923	Mauri Kiudsoo hinnangul sepikoda.	AI PR 7887

45	Jüri	Rae	RSK – K	1. saj eKr–1. saj pKr	Peets 2003, 63; ARHUT ID 13570	Rae rauasulatuskoht.	AI PR 4440, 5034; Mälestis 18852
46	Jüri	Aruvalla	RSK – K		ARHUT ID 13363	Aruvalla rauasulatuskoht. Šlaki leiupaik, kogunud Oskar Raudmets ja Vello Lõugas 1973. a sügisel.	AI PR 4737; Mälestis 18716
47	Jüri	Patika	RSK – K		ARHUT ID 13365	Patika rauasulatuskoht.	Mälestis 18817
48	Jüri	Peetri alevik	RSK – K		ARHUT ID 13944	Peetri rauasulatuskoht. Šlaki leiupaik.	AI PR 5837
49	Jüri	Karla	RSK – K	1. saj eKr–1. saj pKr	Peets 2003, 63; ARHUT ID 13693	Jüri rauasulatuskoht.	AI PR 6801: 1
50	Jüri	Kurna	M – O		ARHUT ID 14022		
51	Jüri	Kurna	SPK/M – O		ARHUT ID 14509	Kurna sepatööpaik, millele viitavad Põllukivi kinnistul kulgeva tee juurest leitud rohked šlakitükid.	AI PR 8104
52	Jüri	Nabala	RSK – K		Mauri Kiudsoo suuline info	Sõmeru rauasulatuskoht. Mauri Kiudsoo ja Arne Kivistik uurinud ja määranud.	
53	Keila	Meremõisa	M – O		Jegorov 2022	Ääsi põhjad ja väiksem šlakitükk, sepatööriistad ja valujäägid. Määratud rauasulatus- ja sepatööpaigaks, kuigi rauasulatuskohaks	

						määramiseks on andmeid liiga vähe.	
54	Keila	Lehola	M – O		Vedru 2014	Šlaki leiupaik. Määratud kalmeks.	
55	Kose	Kiruvere	RSK – O		Kiudsoo 2016, 89; ARHUT ID 15744	Kiruvere rauasulatuskoht. Mauri Kiudsoo sõnul kaitse all ilmselt asulakohana	Mälestis 18546
56	Kose	Vanamõisa	SPK/M – O		ARHUT ID 15745	Pärimuse kohaselt sõjaaegne sepikoda.	
57	Kose	Kuivajõe	SPK/M – O		ARHUT ID 15746	Ilmselt sepikoda, leitud hobuseraud	
58	Kose	Saula	RSK – K		Kiudsoo 2016, 88–89; Mauri Kiudsoo suuline info	Saula rauasulatuskoht.	
59	Kose	Tammiku	M – O		Posti 2021	Leitud üks väike šlakitükk, mille põhjal on võimatu objekti määrata.	
60	Kuusalu	Uuri	M – O		ARHUT ID 7985	Rauamaagi leiupaik.	
61	Kuusalu	Kahala	RSK – K		ARHUT ID 7990	Kahala rauasulatuskoht.	AI PR 7188; Mälestis 18108

62	Tallinn	Tallinna linn	M – K	5.–4. saj eKr	Niinesalu–Moon <i>et al.</i> 2023, 150	Pärnu mnt 41 metallitööpaik. Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanul puuduvad täpsemad asukohaandmed.	AI PR 8244
Järvamaa							
63	Ambla	Jõgisoo	M – O		Kangert ja Kivirüüt 2016	Leitud kolm šlakitükki, samast kohast on leitud viikingiaegne aare. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
64	Anna	Mustla	SPK – K	UA	Kiudsoo 2017a; ARHUT ID 20689	Mustla sepikoda. Leitud ääspõhjašlakki. Sepikoda on kaardil veel 20. sajandilgi.	AI PR 7748
65	Järva–Jaani	Kaaruka	M – O		Reppo 2020	Leitud šlakki, mis on määratud vasesulami šlakiks. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
66	Paide	Paide linn	M – O		ARHUT ID 6860	Paide ordulinnus. Linnusest on leitud šlakki. Liigikindluse määras allakirjutanu. A. Tvauri 2011. a aruandes on kirjas, et šlakk on leitud "mänguväljaku	TÜ PR 1924; Mälestis 15065

						idaserva palissaadi kraavist" (ARHUT) – selle järgi valiti koordinaadid.	
67	Peetri	Öötlä	SPK/M – O	NoRAH, KeA, UA	ARHUT ID 3735	Leidude (tiiglikatked, pronksikämbud) põhjal värviline metallivalu. Dateering kaudne: 12. saj II p. kuni 19. saj.	AI PR 7761
Lääne–Virumaa							
68	Haljala	Kalikäla	M – O		ARHUT ID 20114	Palju tulepesi, muid leide pole	
69	Haljala	Ilumäe	RSK – K	12.–13.– saj	Peets 2003, 85; <i>ibid.</i> , 87, tabel 5: 1; ARHUT ID 18419	Ilumäe I asula– ja rauasulatuskoht. Tln-2119, 803 ± 67 BP, 1177–1286 AD cal. 68,3%	AI PR 6042, 6105
70	Haljala (Kadrina lahusmaatükk)	Ilumäe	RSK – K	12.–13. saj	Peets 2003, 86; ARHUT ID 18696	Ilumäe III asula– ja rauasulatuskoht.	AI PR 6207
71	Haljala (Kadrina lahusmaatükk)	Uusküla	RSK – K	NoRAH, KeA (12.–14. saj)	Peets 2003, 86; ARHUT ID 18762	Uusküla rauasulatuskoht. Peets 2003 lk 86 näib Uusküla tekst olevat poolikuks jäänud.	AI PR 6195

72	Kadrina	Vaiatu	RSK – K	KeA, VUA	Kiudsoo 2017b; Kiudsoo 2018b, 80–81	Vaiatu rauasulatuskoht.	AI PR 7950
73	Kadrina	Vaiatu	SPK – K	KeA, VUA	Kiudsoo 2017b; Kiudsoo 2018b, 80–81	Vaiatu sepikoda.	AI PR 7950
74	Rakvere	Piira	RSK/M – O		Tasuja 2014	Leitud šlakitükk, mis meenutab voolanud rauasulatusšlakki, lisaks tükike toorrauda (?). Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
75	Rakvere	Rakvere linn	SPK – K	16. saj II pool kuni 17. saj I veerand	Aus 1984, 64	Rakvere ordulinnus. Linnuse eelhoovist leiti kahest kõrvuti ruumist hulgaliselt šlakki. Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanul puuduvad täpsemad asukohaandmed.	Mälestised 10335, 15740
76	Viru–Jaagupi	Palasi	RSK – K	12.–13. saj	Peets 2003, 87–91; <i>ibid.</i> , 87, tabel 5: 2; ARHUT ID 11794	Palasi rauasulatuskoht. Tln-1009, 800 ± 35 BP, 1160–1280 AD cal. 68,3%	AI PR 5362; Mälestis 10657
77	Viru–Jaagupi	Palasi	RSK – K	8.–9. saj	Peets 2003, 71–72; <i>ibid.</i> , 56, tabel 4: 8	Saunakünka rauasulatuskoht. Tln–2122, 1235 ± 44 BP, 724–878 AD cal. 68,3%	Mälestis 10656
78	Viru–Nigula	Kõrma	RSK – K		ARHUT ID 19085	Rihula I rauasulatuskoht.	TÜ PR 2657

79	Viru–Nigula	Kõrma	RSK – K	8.–10. saj	Jegorov <i>et al.</i> 2023, 107–114; ARHUT ID 19086	Rihula II rauasulatuskoht. UBA- 50399, 1166±23 BP; 774–790, 802–811, 819– 900, 917–974 AD	TÜ PR 2658, 3060
80	Viru–Nigula	Kõrma	RSK – K		ARHUT ID 19087	Rihula III rauasulatuskoht.	TÜ PR 2659
Ida– Virumaa							
81	Iisaku	Ongassaare	M – K		ARHUT ID 11212	Šlaki leiupaik. Kuusikus palju šlakki, rahvapärane kohanimi "Rauaahju mägi".	
82	Iisaku	Metsküla	RSK – K	1.–3. saj	Peets 2003, 51–56; <i>ibid.</i> , 56, tabel 4: 5–7; ARHUT ID 11213	Mäetaguse Metsküla rauasulatuskoht. Radiosüsiniku dateeringud Peets 2003, 56, tabel 4.	AI PR 6475, 6543
83	Iisaku	Alliku	M – K		ARHUT ID 12249	Šlaki leiupaik.	
84	Iisaku	Sälliku	RSK – K		ARHUT ID 12262	Sälliku rauasulatuskoht.	TÜ PR 2450
85	Iisaku	Pootsiku	M – O		Posti 2018	Leitud viis šlaki ehk räbu kamakat, tules sulanud ja porsunud. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
86	Iisaku	Varesmetsa	M – O		ARHUT ID 12268	Varesmetsa asulakohalt on leitud šlakki.	TÜ PR 2453

						Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
87	Jõhvi	Vasavere	RSK – K		ARHUT ID 12283	Vasavere rauasulatuskoht. Šlaki leiupaik.	TÜ PR 2454
88	Jõhvi	Päite	SPK/M – K		Peets 2003, 179	Päite sepikoda.	AI PR 6474, 6544; Mälestis 9156
89	Jõhvi	Pagari	RSK/M – K		KMR	Pagari rauasulatuskoht.	Mälestis 9132
90	Jõhvi	Roodu	RSK/M – K		KMR	Roodu rauasulatuskoht.	Mälestis 9013
91	Jõhvi	Peeri	M – O		Tamla 2020	Šlaki leiupaik. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	
92	Jõhvi	Toila alevik	SPK – K	4.–2. saj eKr	Kriiska <i>et al.</i> , ilmumas	Poz-163739, 2190±30, 370–170 BC cal. 95,4%. Koordinaadid on võetud viidatud artiklis oleva prooviaukude joonise järgi.	AI PR 8649
93	Lüganuse	Tarumaa	RSK – K	13.–14. saj	Peets 2003, 93–98; <i>ibid.</i> 87, tabel 5: 4–5	Tarumaa rauasulatuskoht.	Mälestis 9123
94	Lüganuse	Rebu	RSK – K	14.–15. saj	Peets 2003, 91–93; <i>ibid.</i> , 87, tabel 5: 3	Rebu rauasulatuskoht.	Mälestis 9119
Jõgevamaa							
95	Laiuse	Alavere, Laiuse alevik	SPK – K	NoRAH, KeA	ARHUT ID 14108	Mauri Kiudsoo hinnangul sepikoda.	AI PR 7255
96	Laiuse	Endla	M – O		ARHUT ID 6720	Šlaki leiupaik.	AI PR 4740

97	Laiuse	Patjala	RSK – K	14.–15. saj	Ragnar Saage suuline info; ARHUT ID 5324	Patjala (end. Kassinurme) rauasulatuskoht. Poz-189815, 550±30 BP, 1318–1360 AD, 1388–1434 AD cal. 95,4%	AI PR 4848; Mälestis 9234
98	Palamuse	Varbevere	SPK – K	KeA	ARHUT ID 5289	Varbevere sepikoda.	
99	Palamuse	Varbevere	RSK – K	KeA, VUA	ARHUT ID 5308	Varbevere rauasulatuskoht	TÜ PR 373; Mälestis 9305
100	Palamuse	Änkküla	SPK/M – O		ARHUT ID 18355	Leitud šlakikook, mis pigem võiks sepikojale viidata.	
101	Põltsamaa	Mõhküla	RSK – K		ARHUT ID 20875	Šlakk on väga tugevalt rauasulatusel tekkinud voolanud šlaki ilmega. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	TÜ PR 3191
102	Põltsamaa	Põltsamaa linn	M – O		ARHUT ID 4965	Põltsamaa ordulinnus. Linnuse väravahoone juurest on leitud šlakki. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu. Kuna šlakki ei olnud palju, ei ole alust seda kohe sepikojaks pidada.	TÜ PR 714; Mälestis 9334
103	Torma	Torma alevik	M – O		ARHUT ID 6273	Leitud sooraud ja šlakitükid. Pole teada, kas sooraua all on mõeldud rauamaaki või rauda.	

104	Torma	Vaiatu	SPK/M – O		ARHUT ID 6618	Pärimuse kohaselt olnud Koopamäel vanaaegne sepapada.	AI PR 4741
Viljandimaa							
105	Karksi	Karksi–Nuia linn	M – O		ARHUT TÛ PR 3147	Šlaki leiupaik. Liigikindluse määras allakirjutanu.	TÛ PR 3147
106	Karksi	Karksi–Nuia linn	M – K		ARHUT ID 3536	Karksi ordulinnus. Linnuselt on leitud šlakki. Liigikindluse määras allakirjutanu.	TÛ PR 1929, 2195; Mälestis 14485
107	Kõpu	Puiatu	SPK/M – O		ARHUT ID 4160	Tagilibled ja söepuru leiukoht. Pärimuse järgi "Olevat olnud Villu sepikoda". Liigikindluse määras allakirjutat	
108	Pilistvere	Maalasti	SPK/M – K	KeA	Saage <i>et al.</i> 2022, 69; Tvauri 2017; ARHUT ID 20988	ARHUT–is kirjas kui metallivalamise töökoda, leitud šlakitükk, mis võib pigem olla seotud sepistamisega (pildi järgi), Eksperthinnangus sellele hinnangut pole.	TÛ PR 2962, 3125
109	Suure–Jaani	Tääksi	RSK – O		ARHUT ID 8774	Tääksi rauasulatuskoht ja sepikoda. Liigi(kindluse) määras Jüri Peets.	AI PR 5933, 5941

110	Suure-Jaani	Olustvere	RSK – K	1.–5. saj	Peets 2003, 63–64; ARHUT ID 10427	Olustvere rauasulatuskoht.	Mälestis 13256
111	Suure-Jaani	Võlli	SPK/M – O		ARHUT ID 4859	Pärimuse järgi vana sõjariistade valmistuskoht ehk sepikoda.	
112	Suure-Jaani	Lõhavere	M – K		ARHUT TÛ PR 2836	Lõhavere linnus. Linnusest on leitud šlakki. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu. Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanal puuduvad täpsemad asukohaandmed.	AI PR 3578, 4133, 4297; TÛ PR 2836; Mälestis 13326
113	Tarvastu	Sooviku	SPK – K	14.–16. saj	Oks 2022, 3	Tarvastu ordulinnuse sepikoda.	TÛ PR 2960; Mälestis 14673
114	Viljandi	Viljandi linn	SPK/M – O	14.–15. saj	Haak 2006, 71–72; ARHUT ID 20057	Leitud palju sepašlakki, ilmselt keskaegne sepikoda.	VM 11600 A
115	Viljandi	Savikoti	M – O		ARHUT ID 20061	Šlaki leiupaik.	
Tartumaa							
116	Kambja	Lalli	RSK – K	VUA, UA	ARHUT ID 20888	Šlaki leiupaik.	TÛ PR 3037
117	Kambja	Unipiha	M – K	3.–4./7.–11. saj (KMR)	Peets 2003, 68	Unipiha linnamägi. Šlaki ja klaasistunud pinnaga ahju- või ääsisena fragmentide põhjal on tegu kas rauasulatus- või	AI PR 4472; Mälestis 12905

						töötuskohaga. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu. Koordinaadid on oletuslikud. Allakirjutanal puuduvad täpsemad asukohaandmed.	
118	Kodavere	Punikvere	RSK – K	13.–14. saj	Peets 2003, 98–99; <i>ibid.</i> , 87, tabel 5: 6; ARHUT ID 10580	Punikvere rauasulatuskoht.	AI PR 5273; Mälestis 9258
119	Kodavere	Raatvere	RSK – K	10.–11. saj	Lavi 1999, 44–49; Peets 2003, 72–76; <i>ibid.</i> , 56, tabel 4: 9); ARHUT ID 5852	Raatvere rauasulatuskoht.	AI PR 4717, 4858, 5295; Mälestis 9261
120	Kodavere	Moku	SPK/M – O		ARHUT ID 254	Kõrval asuvad Raudsepa tali ja samanimeline katastriüksus, seega ilmselt sepikoda.	
121	Maarja– Magdaleena	Nigula	RSK – K	1.–4. saj (Peets 2003, 56, tabel 4)	Peets 2003, 60–62; <i>ibid.</i> , 56, tabel 4: 3–4; ARHUT ID 6279	Puiato rauasulatuskoht.	AI PR 5066, 6209; Mälestis 12993
122	Maarja– Magdaleena	Pataste	RSK – K	1. saj eKr–2. saj pKr (Peets 2003, 59)	Peets 2003, 57–60; <i>ibid.</i> , 56, tabel 4: 1–2; ARHUT ID 6329	Tindimurru rauasulatuskoht.	AI PR 5049, 5363; Mälestis 9417
123	Nõo	Elva linn	M – K		Siig 2013, 101	Peedu Kerikmäe linnamägi. Linnuselt on leitud rauašlakki. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	Mälestis 12788

124	Rõngu	Uderna	M – K	6.–10. saj	Peets 2014, 243; ARHUT ID 3078	Uderna II asulakoht. Šlaki ja klaasistunud pinnaga ahju– või ääsideina fragmentide põhjal on tegu kas rauasulatus– või töötuskohaga. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	AI PR 5456; TÜ PR 2223; Mälestis 12961
125	Tartu–Maarja	Tartu linn	RSK – K	14.–15. saj	Blehner <i>et al.</i> 2023, 87–88	Tartu Lossi tn rauasulatuskoht ja sepatöö keskus. TA-2029, 490±50 BP, 1317–1494 AD cal. 95,4% – dateering rauasulatusahjust.	
126	Võnnu	Kannu	M – O		ARHUT ID 5703	Šlaki leiupaik.	
Põlvamaa							
127	Kanepi	Soodoma	RSK – K	NoRAH, KeA, VUA, UA (II at)	ARHUT ID 2323	Soodoma rauasulatuskoht.	AI PR 5784; Mälestis 10984
128	Kanepi	Magari	M – O		ARHUT ID 2349	Šlaki leiupaik.	
129	Räpina	Nulga	M – VK		ARHUT ID 10958	Rauajupid ja must muld – rahva sõnul olnud vanal ajal sepikoda.	
130	Räpina	Meerapalu	SPK/M – O		Rannaäär 2024	Leitud üks šlakipäts, tundub nagu ääsidepõhja šlakk. Ilmselt sepikoda.	

						Liigi(kindluse) määras allakirjutanu	
131	Võnnu	Kärša	M – O		ARHUT ID 20072	Šlaki leiupaik. Sepa talu, kuid Arvi Lauringson pidas rauasulatuskohaks. Ei ole võimalik hetkel määrata.	
Valgamaa							
132	Hargla	Laanemetsa	RSK – K	KeA, UA	ARHUT ID 7543	Tsirgumäe Kõrgeperve rauasulatuskoht. Toorraua ja šlaki leiupaik.	TÜ PR 1446
133	Helme	Koorküla	M – O		ARHUT ID 4411	Šlaki leiupaik.	
134	Helme	Patküla	M – K			Šlaki leiupaik	TÜ PR 3164
135	Karula	Karula	SPK/M – O		ARHUT ID 9481	Rahvapärane kohanimi "Sepikoja maa". Kõrval asub Karula mõisa sepikoda.	
136	Karula	Lüllemäe	M – VK		ARHUT ID 10036	Pärimus rahaaugutuledest (Jung).	
137	Karula	Lüllemäe	SPK/M – O		ARHUT ID 7745	Rahvapärane kohanimi "Sepistumägi".	
138	Otepää	Märdi	M – VK		ARHUT ID 11538	Pärimuse kohaselt asunud mäel varem sepikoda.	
139	Otepää	Otepää	RSK – O		ARHUT ID 846	Leitud šlakki ja jälgi sulatusahjust.	AI PR 5942

140	Otepää	Neeruti	SPK/M – O		ARHUT ID 11498	Leitud palju raudesemeid, ilmselt sepikoda.	
Võrumaa							
141	Karula	Jõepera	M – O	RmRA/KeA (?)	ARHUT ID 20154	Šlaki ja põlenud savi leiupaik.	TÜ PR 2751
142	Rõuge	Meeliku	M – O		ARHUT ID 50	1981. a pärimuse järgi tulnud talu maal maaparanduse käigus välja rauasulatusahju jäänused.	
143	Rõuge	Vodi	M – VK		ARHUT ID 12424		
144	Rõuge	Tindi	M – K	6.–10. saj	Peets 2014, 243	Rõuge muinasasula. Šlaki ja klaasistunud pinnaga ahju- või ääsideina fragmentide põhjal on tegu kas rauasulatus- või töötuskohaga. Liigi(kindluse) määras allakirjutanu.	AI PR 4100; Mälestis 13641
145	Seto (EE)	Laossina	SPK/M – O		ARHUT ID 8803	Sepikoja vundament ja šlaki leiupaik.	
146	Seto (EE)	Hilana	SPK – K	KeA, VUA (15.–16. saj)	ARHUT ID 3684	Jüri Peetsi hinnangul sepikoda.	TÜ PR 129; Mälestis 13520
147	Seto (EE)	Väike-Rõsna	SPK – K		ARHUT ID 8923	Väike-Rõsna sepikoda. Šlaki ja toorraua leiupaik.	AI PR 6060, 6251; TÜ PR 190
148	Seto (EE)	Korela	SPK/M – O	KeA (?)	ARHUT ID 10718	Suure-Korela II asulakohalt leitud	AI PR 6288

						piiratud alalt (5x5 m) šlakki.	
149	Seto (EE)	Perdaku	M – O		ARHUT ID 10731	Šlaki leiupaik.	AI PR 6117
150	Seto (EE)	Tserebi	M – O		ARHUT ID 10740	Šlaki leiupaik.	
151	Seto (EE)	Helbi	M – O	KeA (?), VUA (?) (ARHUT)	ARHUT ID 10798	Pärimuslik "põletamise koht", maa sees 2–2,5 m läbimõõduga ringi moodi kohad. Peetud lubjapõletusahjudeks.	
152	Seto (EE)	Kalatsova	RSK – K	1.–5. saj	Peets 2003, 67–68	Kalatsova rauasulatuskoht.	TÜ PR 128; Mälestis 13529
153	Vastseliina	Siksälä	RSK – K	1.–5. saj	Peets 2003, 66–67; ARHUT ID 11738	Siksälä rauasulatuskoht. ARHUT-is liigikindlus "Oletatav", kuigi tegelikult on kindel.	AI PR 5101, 7199; Mälestis 13611
154	Vastseliina	Raadi	M – VK		ARHUT ID 9981	Rauapuru leiukoht, peetud sepikojaasemeks.	

Tabelis kasutatavad lühendid:

ARHUT ID– Tartu ülikooli Arheoloogia Andmebaas, koha ID;

TÜ PR – Tartu Ülikooli pearaamat, leiu peanumber;

AI PR – Ajaloo Instituudi pearaamat, leiu peanumber;

AM – Ajaloomuuseum;

VM – Viljandi muuseum;

KMR – Kultuurimälestiste riiklik register;

RSK – Rauasulatuskoht;

RSK/M – Määramata rauatööpaik, mis allakirjutanu hinnangul võib olla rauasulatuskoht;

SPK – Sepikoda;

SPK/M – Määramata rauatööpaik, mis allakirjutanu hinnangul võib olla sepikoda;

M – Määramata rauatööpaik;

K – Muistiseliik „kindel“;

O – Muistiseliik „oletatav“;

VK – Muistiseliik „väga kahtlane“

RmRA – Rooma rauaaeg;

NoRA – Noorem rauaaeg; NoRAV – Viikingiaeg; NoRAH – Hilisrauaaeg;

KeA – Keskaeg;

VUA/UA – Varauusaeg/uusaeg

Lisad: tabel 2

Tabel 2. Mikrokõvaduse mõõtmised. Mõõtekohad joonistel 11–13, 17, 19–26.

Proovi nr.	Mõõtmise koht	Struktuur	Vahemik	Keskmine	Raskus
Patjala ML 148	1	Ferriit	98–139	123	HV0.5
	2	Ferriit	95–115	108	HV0.5
	3	Ferriit	132–184	150	HV0.5
Kõpu ML 134	1	Perliit ja ledebüriit	454–539	484	HV0.5
	2	Perliit ja ledebüriit	475–547	508	HV0.5
	3	Perliit ja ledebüriit	486–594	523	HV0.5
Kõpu ML 135	1	Ferriit	135 – 150	143	HV0.5
	2	Ferriit ja perliit	164 – 195	182	HV0.5
	3	Perliit	244 – 268	260	HV0.5
Mägipe ML 133	Foto 11: B	Ferriit	100	100	HV0.5
Lalli ML 151	1	Ferriit ja perliit	130–176	147	HV0.5
	2	Perliit	205–233	216	HV0.5
	3	Ferriit ja perliit	135–157	148	HV0.5
Aa ML 27	1	Süsinikuvaba ferriit	191–248	213	HV0.5
	2	Süsinikuvaba ferriit	130–177	160	HV0.5
	3	Süsinikuvaba ferriit	105–134	121	HV0.5
Alulinna ML 15	1	Ferriit	157–184	168	HV0.5
	2	Widmanstätteni ferriit	147–184	166	HV0.5
	3	Martensiit	145–275	216	HV0.5
	4	Ferriit	121–137	128	HV0.5
	5	Termotöödeldud struktuur	314–342	329	HV0.5
Varja ML 28	1	Ferriit	105–117	110	HV0.5

	2	Ferriit	101–123	113	HV0.5
	3	Ferriit	106–123	113	HV0.1
	4	Ferriit	99–114	106	HV0.5
Metsamägara ML 7	1	Widmanstätteni ferriit ja perliit	117–147	130	HV0.5
	2	Üleeutektoidne teras (tsementiit, perliit)	197–264	223	HV0.5
	3	Ferriit ja perliit	103–126	116	HV0.5
	4	Ferriit ja perliit šlakis	106–137	118	HV0.5
	5	Ferriit ja perliit	93–107	99	HV0.5
Praaga ML 19	1	Ferriit	124	124	HV0.5 ja HV0.1
	2	Ferriit	73–90	82	HV0.3
	3	Ferriit	84–130	105	HV0.1
	4	Ferriit	80–101	90	HV0.1
	5	Ferriit	76–105	90	HV0.1
Ollepa ML 25	1	Ferriit	89–104	97	HV0.5
	2	Ferriit	72–90	88	HV0.5
	3	Ferriit	84–108	94	HV0.5
	4	Ferriit	80–101	87	HV0.5
	5	Widmanstätteni ferriit	105–133	117	HV0.5
Sürgavere ML 31	1	Ferriit, perliit	91–99	94	HV0.5
	2	Ferriit	68–90	79	HV0.5
	3	Ferriit	87–92	90	HV0.5
Tindimurru ML 147	1	Ferriit	220–278	247	HV0.5
	2	Ferriit	145–176	160	HV0.5
	3	Ferriit	104–134	121	HV0.5

Lisad: fotod

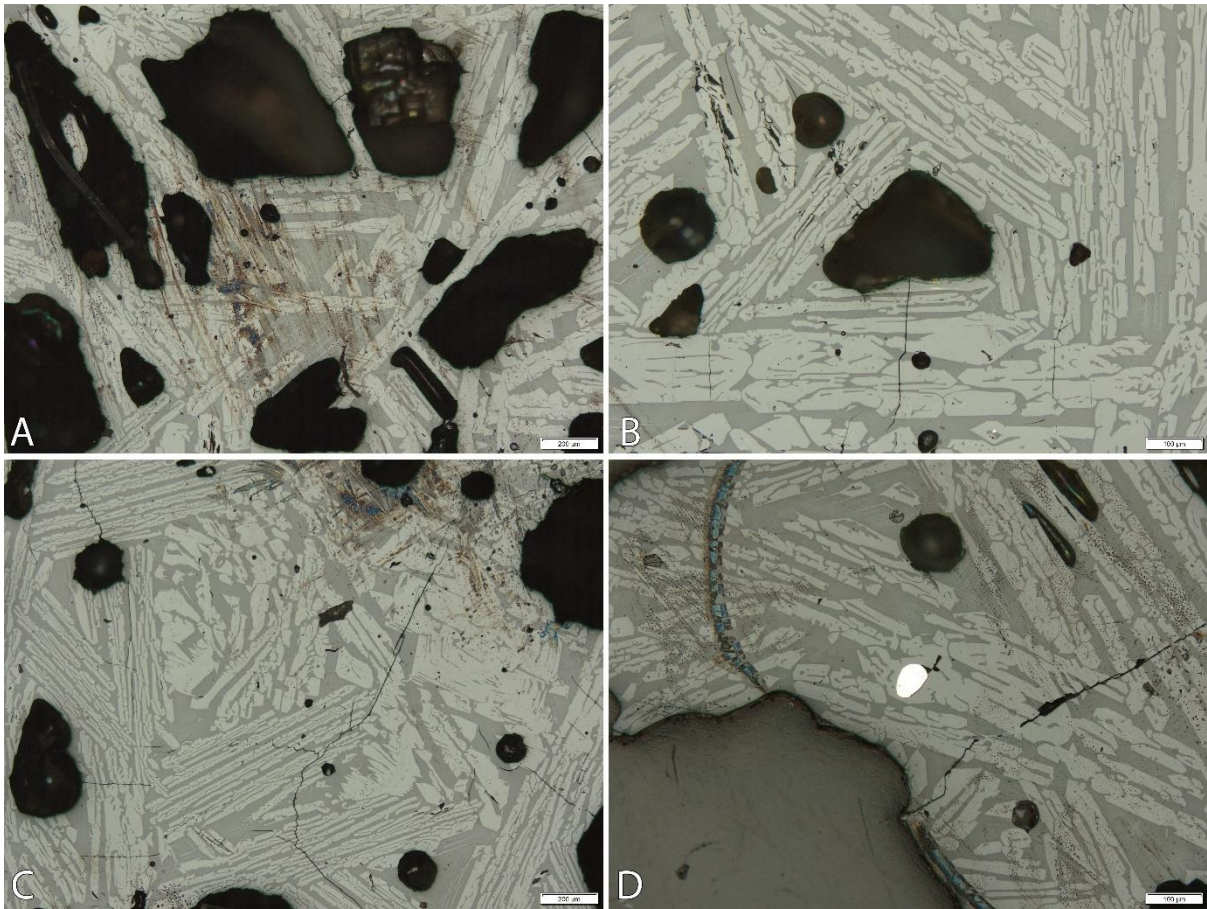


Foto 1. Käku ML 157 mikrofotod: A–D – fajaliit ja poorid; D – ferriit.

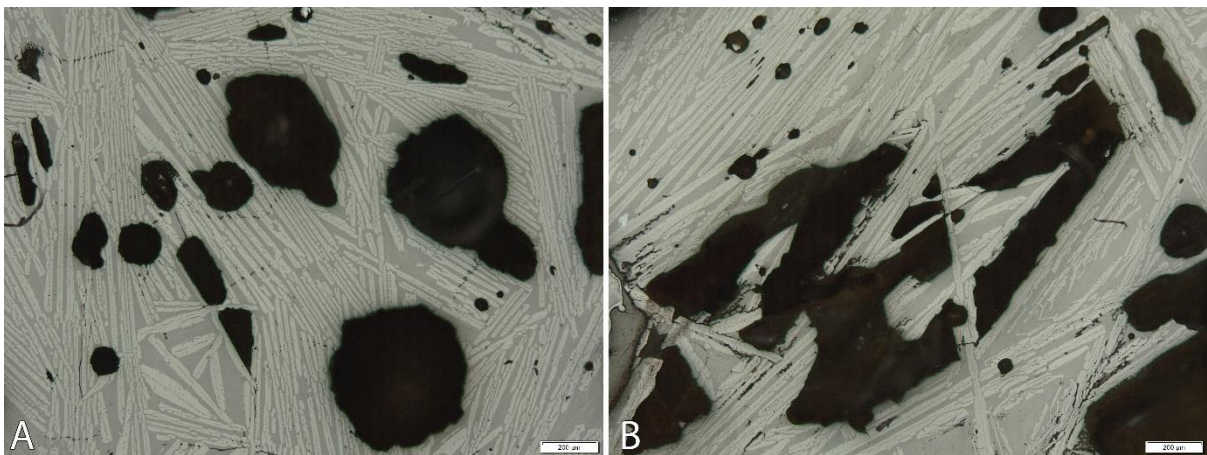


Foto 2. Käku ML 159 mikrofotod: A–B – poorid ja fajaliidilaastud.

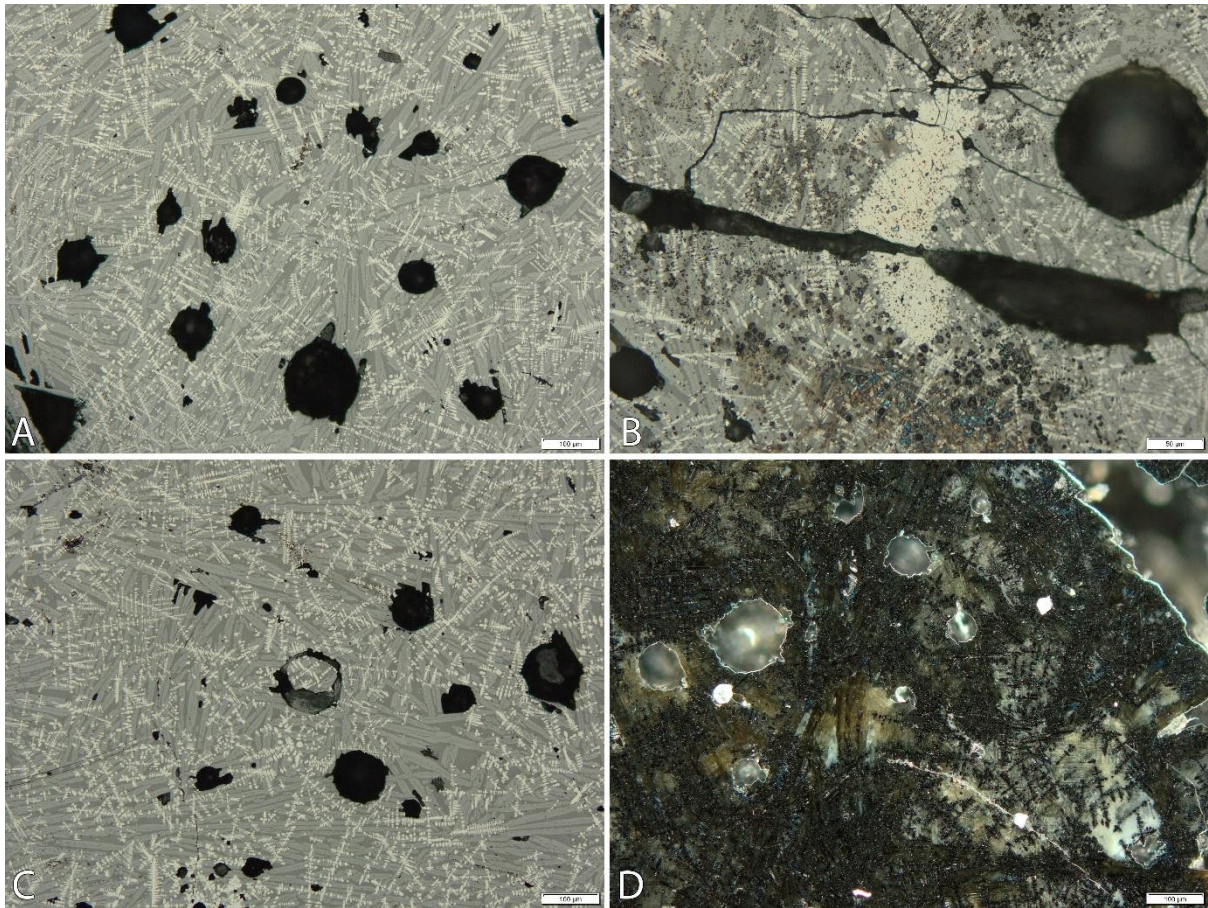


Foto 3. Tarvastu ML 160 mikrofotod: A – poorid; B – tagilaast vüstiidina; C – šlakipesa; D – kvartsiterad (valged laigud) šlakis polariseeritud valguse all.

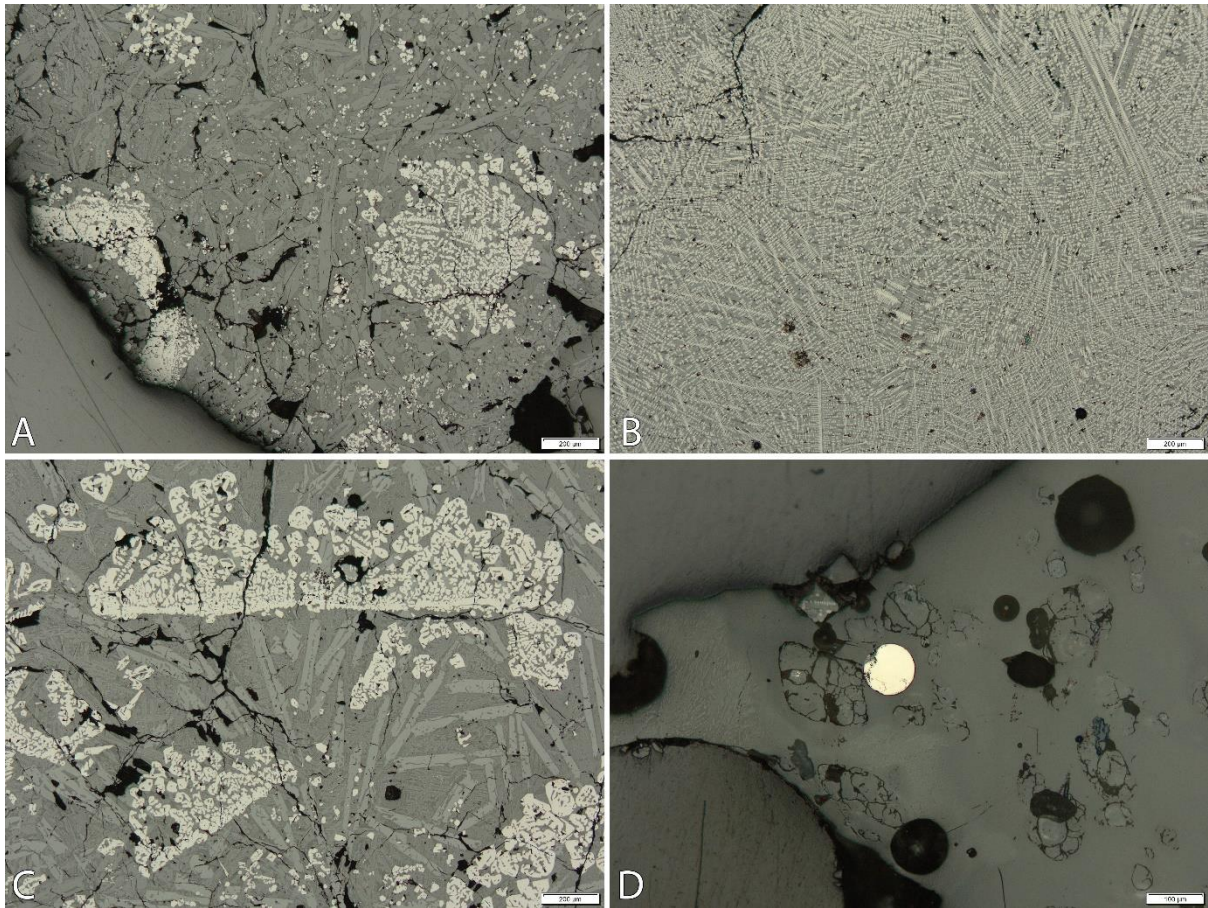


Foto 4. Tarvastu ML 161 mikroftod: A – ühtlane fajaliit ja vüstiidikogumid; B – dendriitne vüstiit; C – osaliselt lahustunud tagilaastud magnetiidina; D – ferriit klaasis.

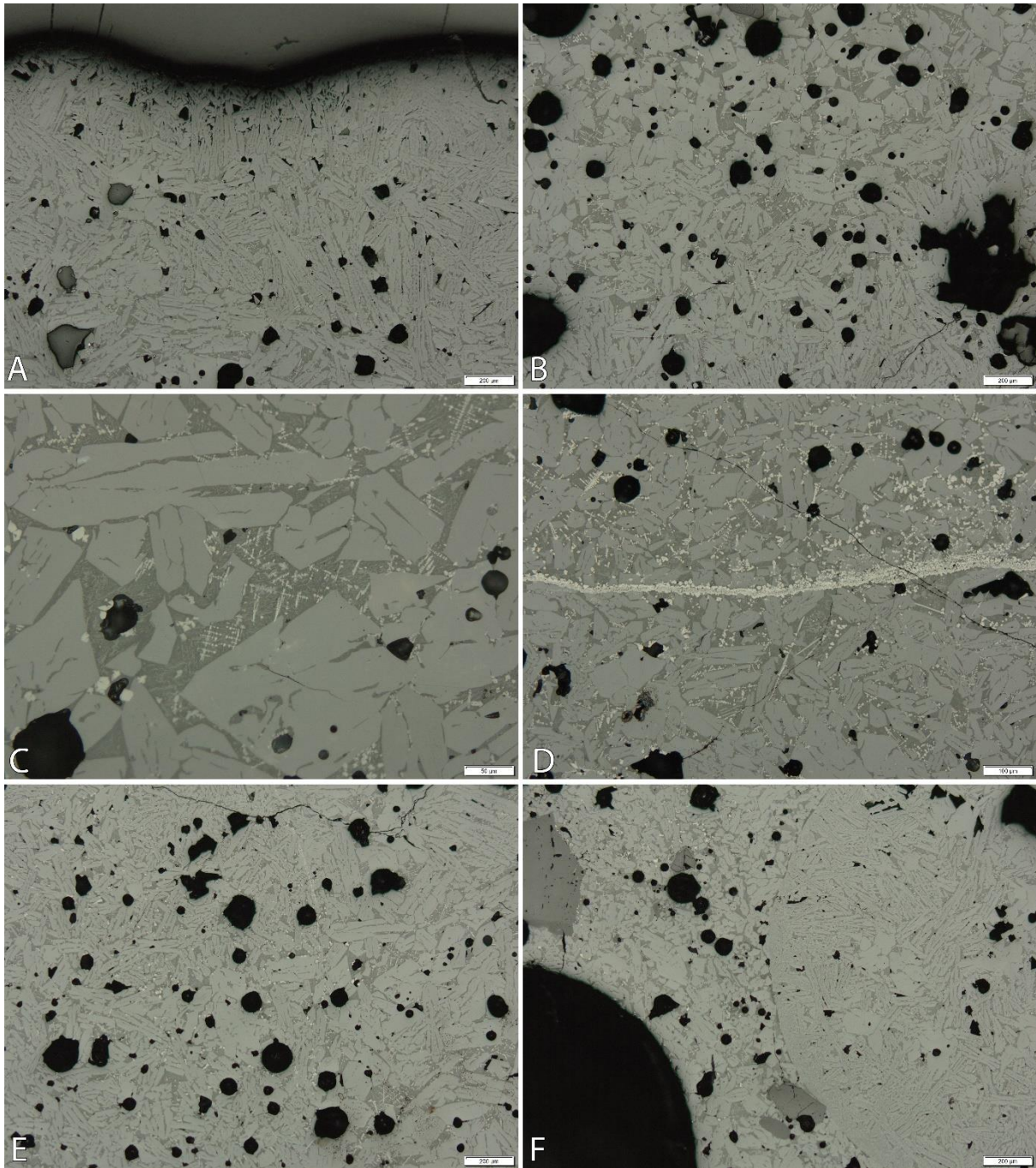


Foto 5. Tindimurru ML 146 mikrofotod: A – fajaliidilaastud proovi servaosas; B – suured fajaliidikristallid proovi keskosas; C – vüstiidi dendriidid klaasis; D – vüstiidivöö; E – poorid; F – šlaki kaks ladestumisjärku.

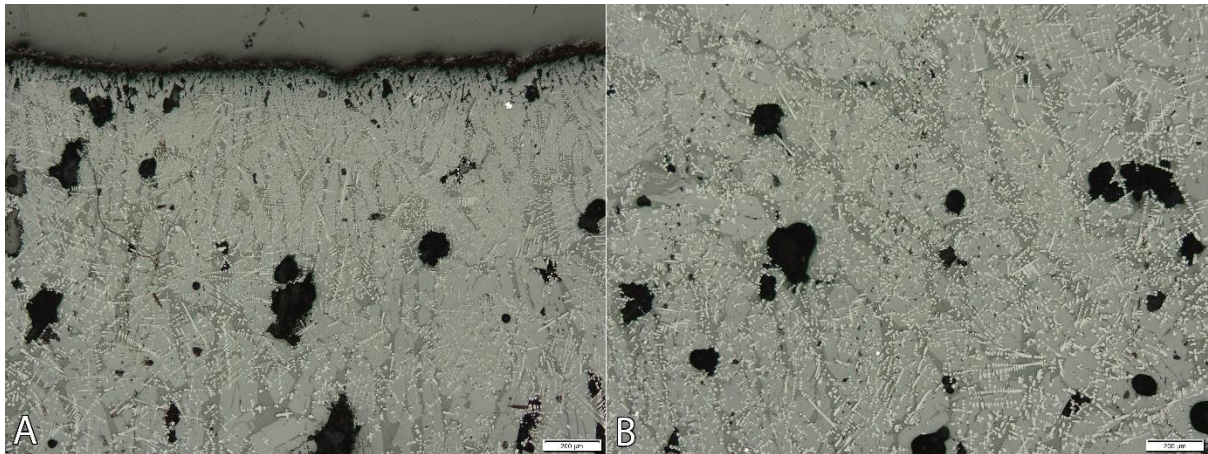


Foto 6. Rihula ML 109 mikrofotod. A – fajaliidilaastud servaalal; B – suuremad fajaliidikristallid proovi keskosas ja vüstiit.

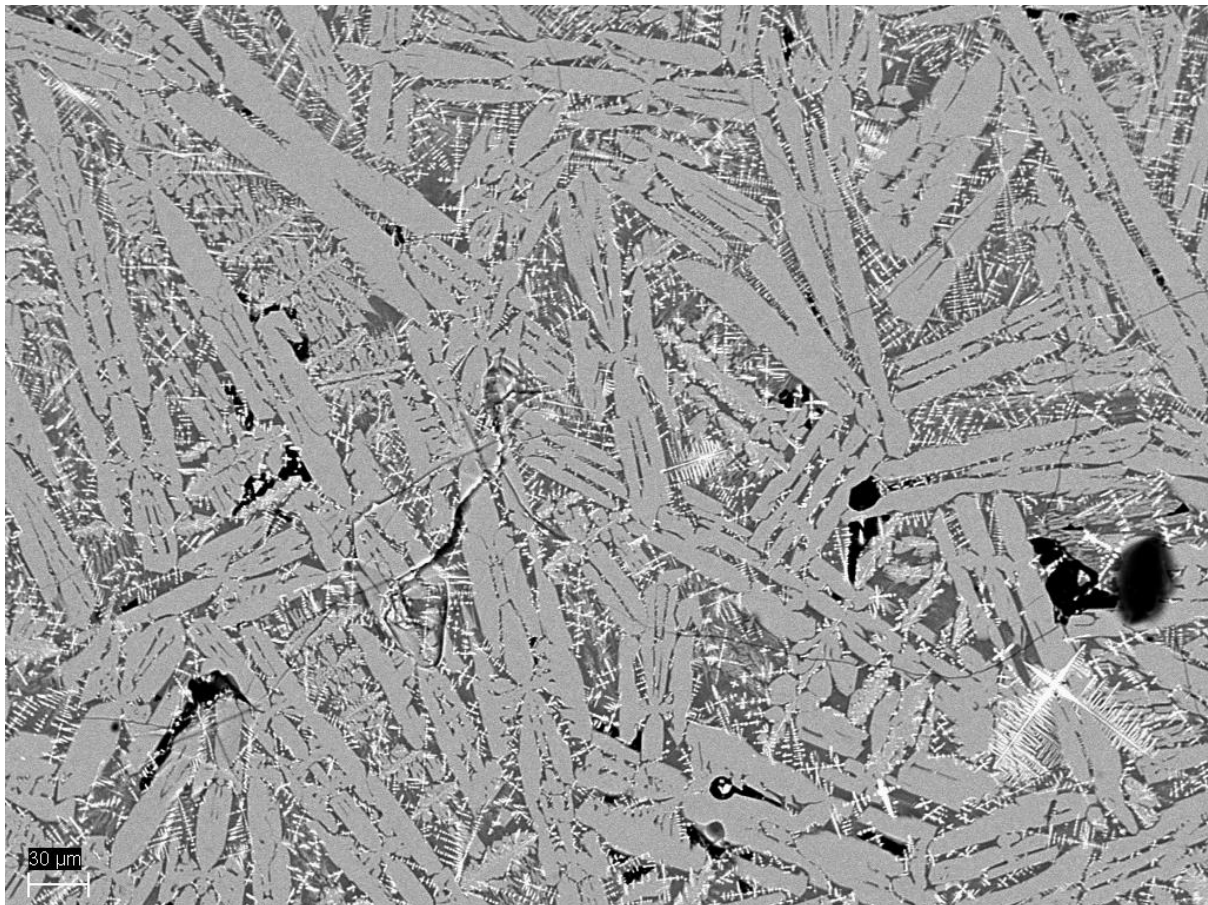


Foto 7. Tuiu ML 111 struktuur TÜ Geoloogia osakonna SEM–EDSiga pildistatult. Autor: Sander Jegorov; Töötlus: Ragnar Saage.

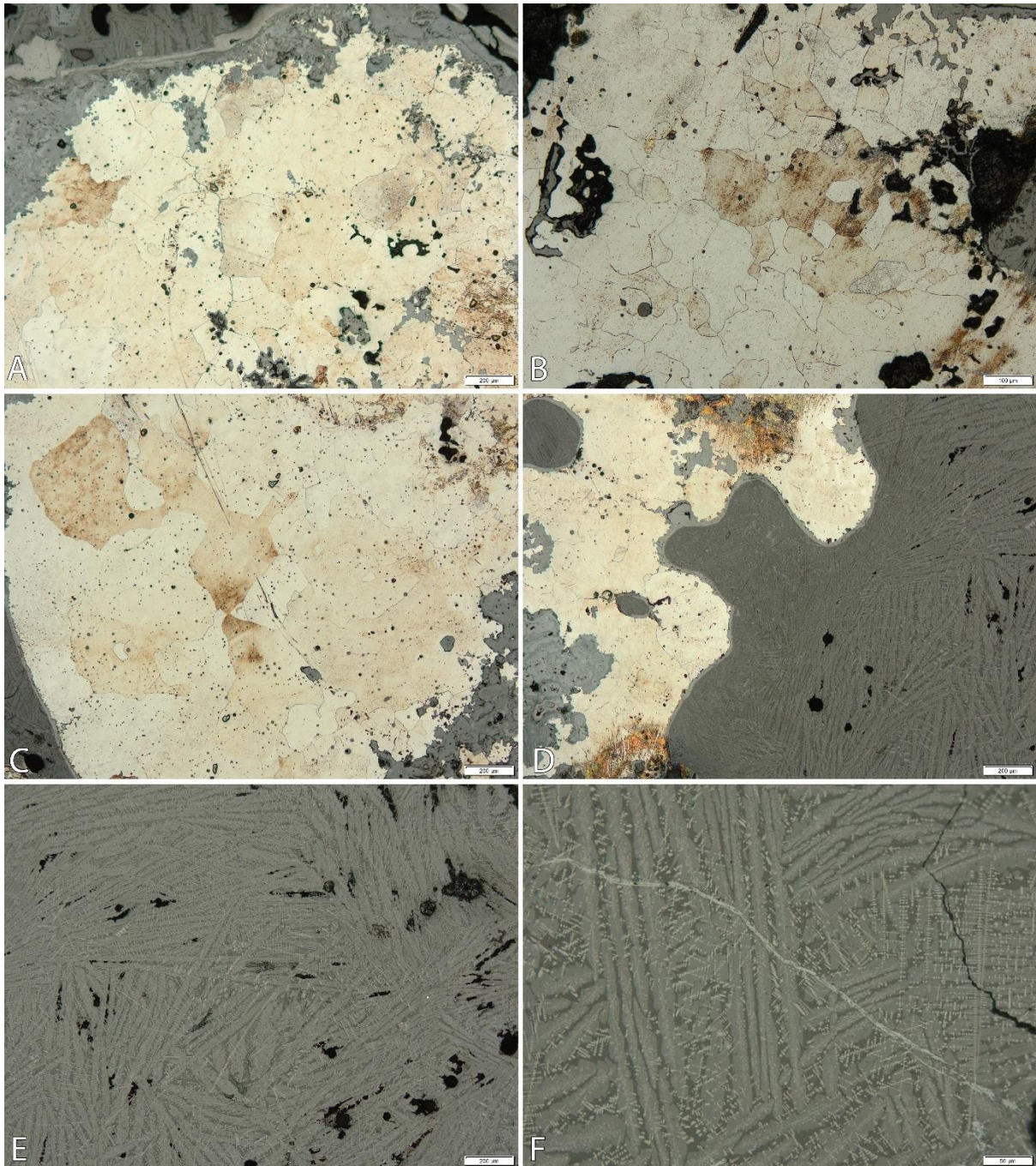


Foto 8. Patjala ML 148 mikrofotod: A–C – ferriit; D – lainetav šlakk ja raud; E–F – fajaliit ja vüstiit.

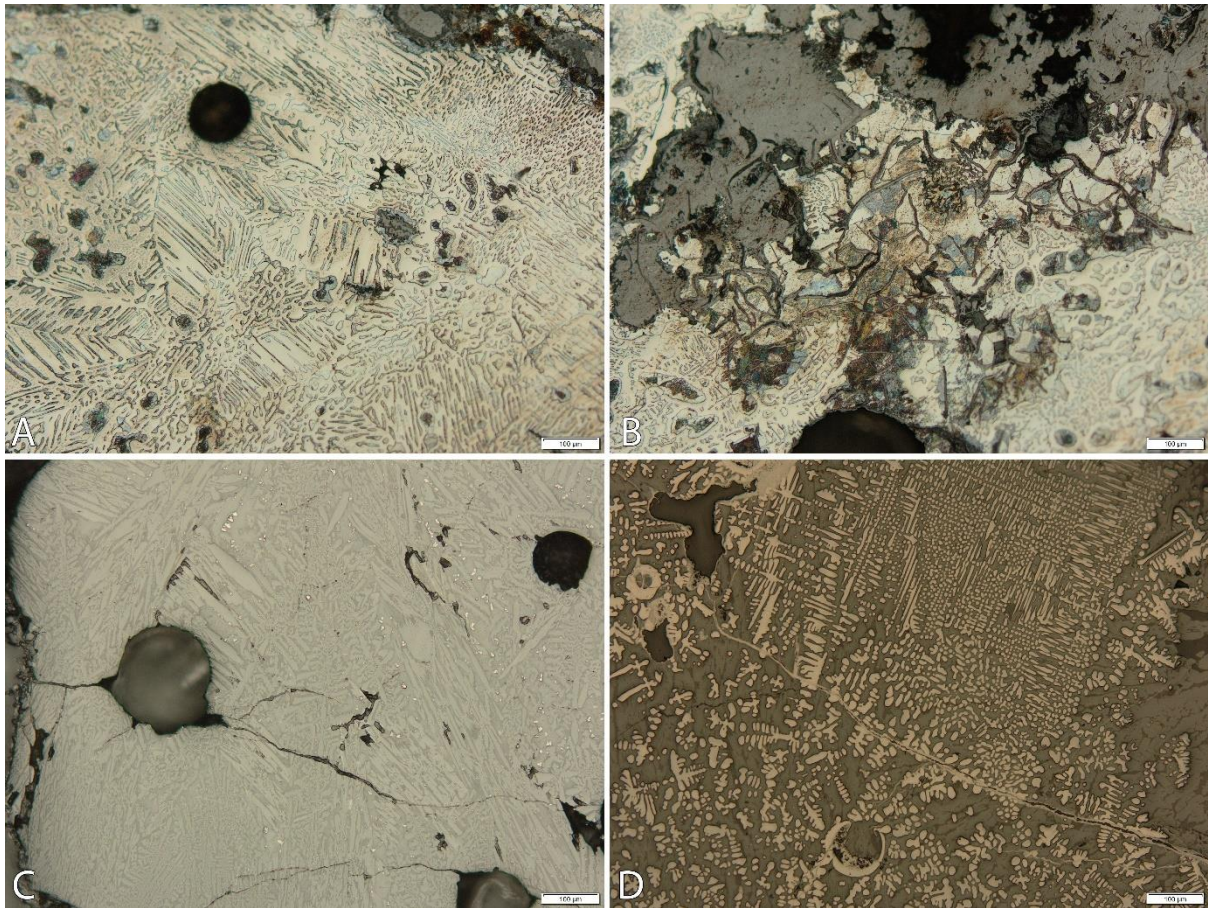


Foto 9. Kõpu ML 134 mikrofotod: A – perliit ja ledebüriit malmis; B – grafiidilibled malmis; C–D – šlakk.

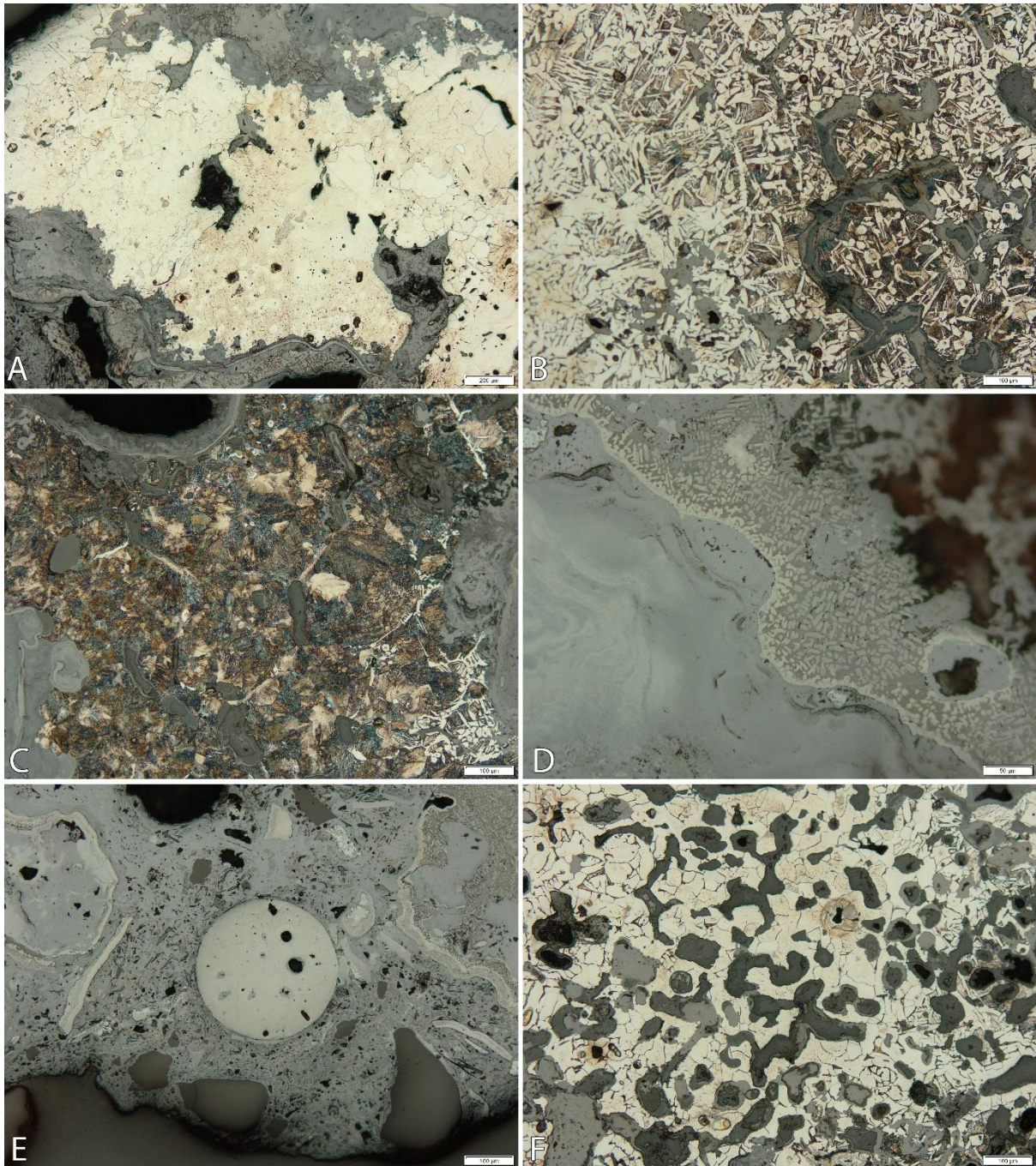


Foto 10. Kõpu ML 135 mikrofotod: A – süsinikuvaba ferriit; B – C-sisaldusega ferriit ja perliit; C – eutektoidne teras; D – klaas ja šlakk; E – tagilaastud ja –kuul; F – šlaki- ja rauasegune struktuur.

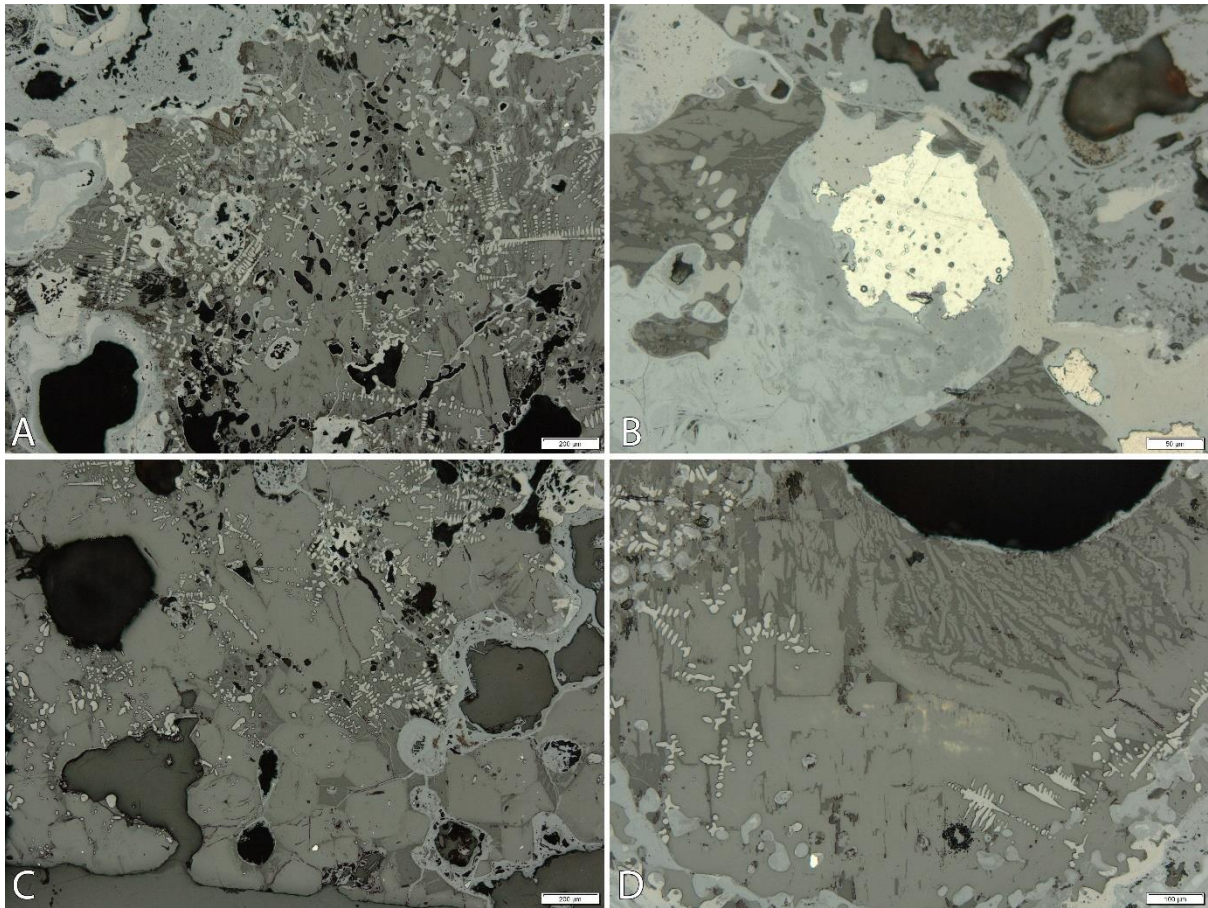


Foto 11. Mägipe ML 133 mikrofotod. A, C–D – šlakk; B – ferriit ja korrosioon.

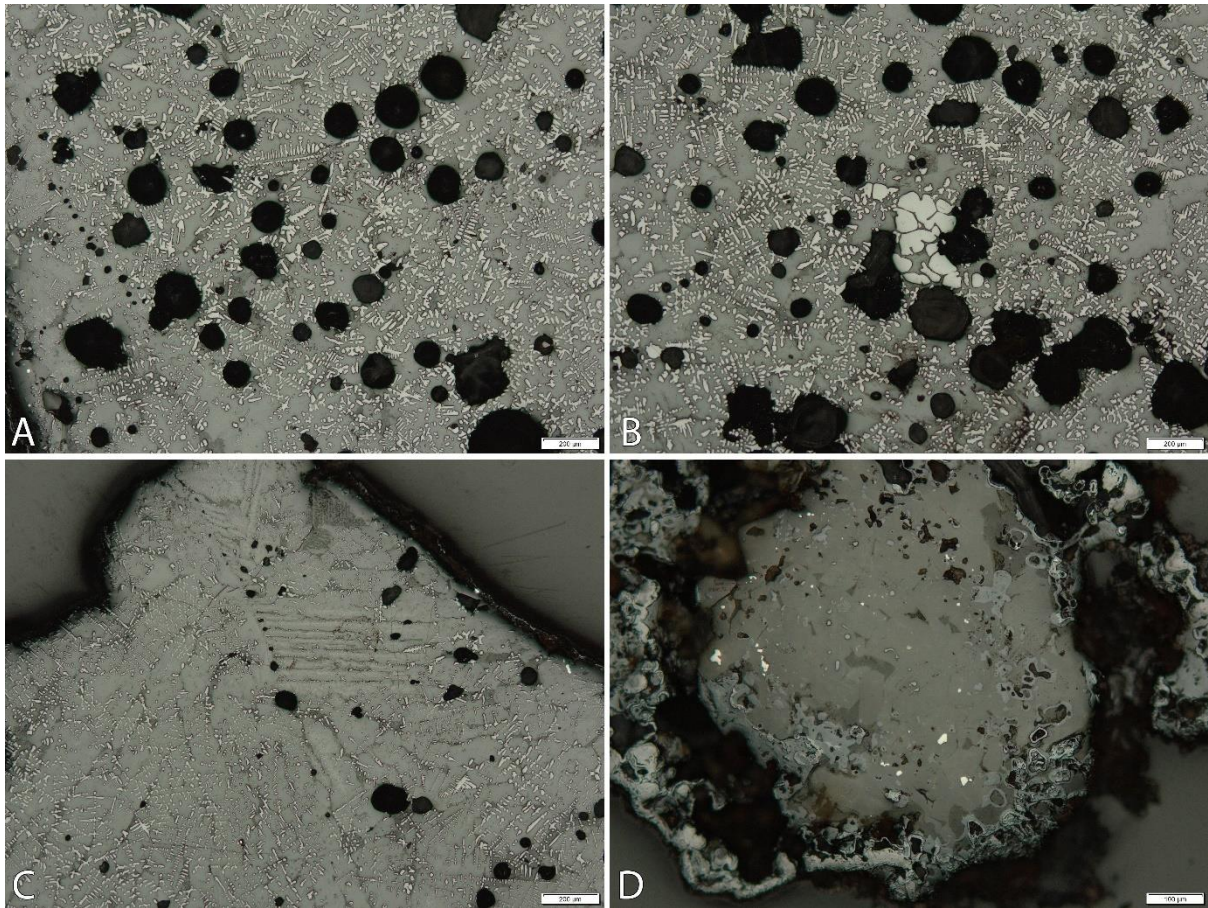


Foto 12. Toila ML 143 mikrofotod: A–B – poorid; B – vüstiidikogum; C – fajaliidilaastud; D – ühtlane fajaliit ja korrosioon.

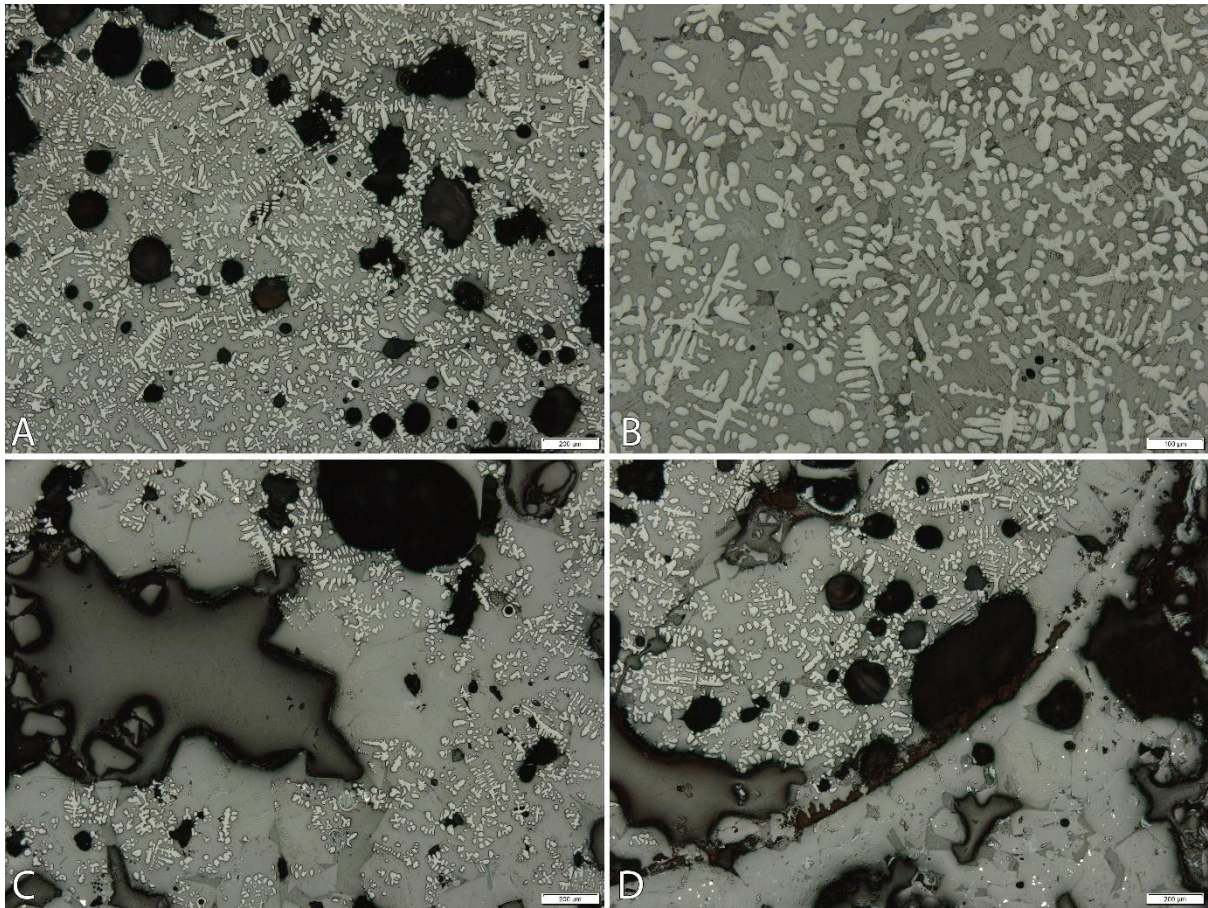


Foto 13. Toila MI 144 mikrofotod: A – poorid; B – fajaliit ja vüstiit; C – ühtlane fajaliit; D – kaks šlaki ladestumisjärku.

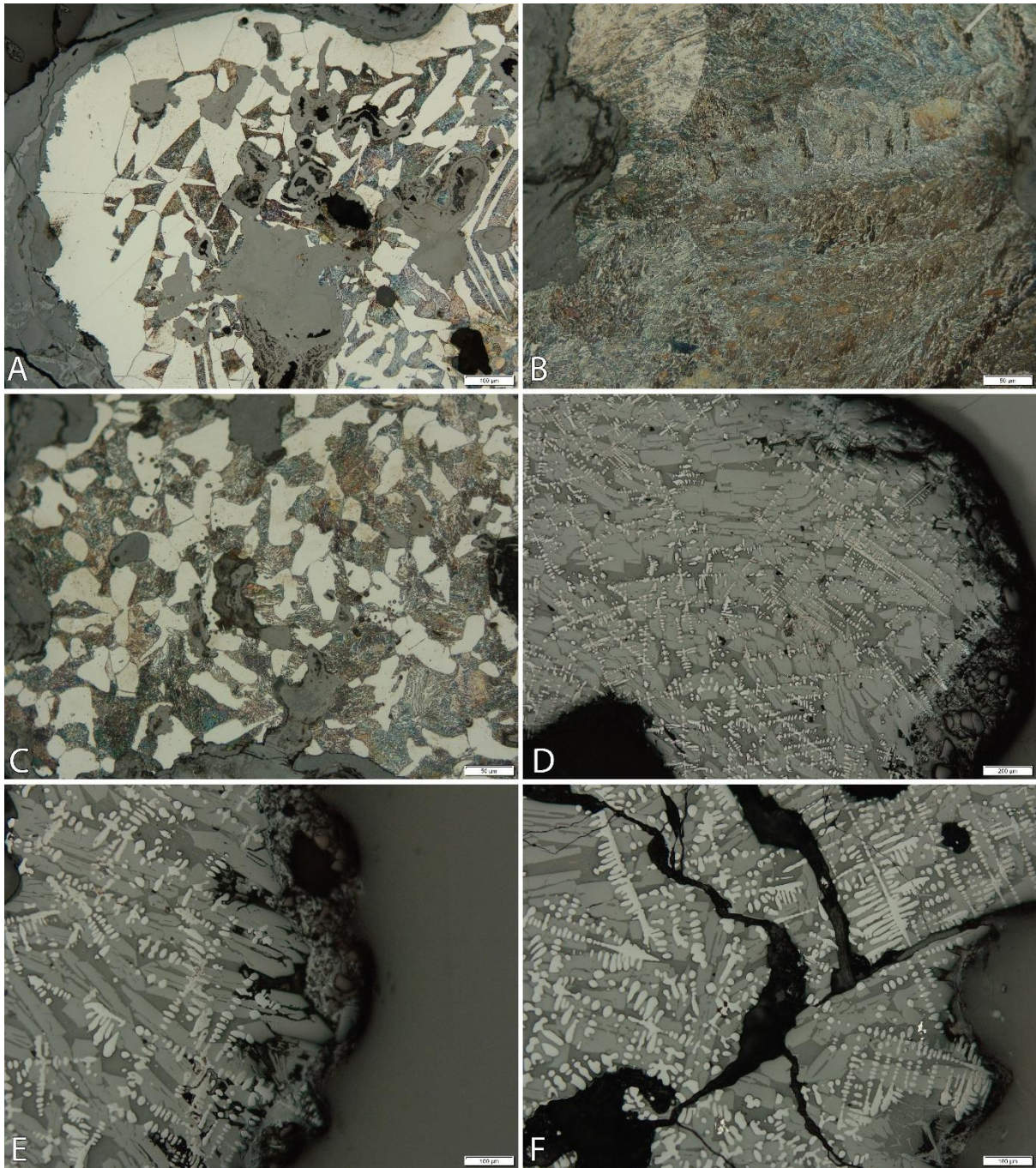


Foto 14. Lalli ML 151 mikrofotod: A, C – ferriit ja perliit; B – perliit; D–F – šlakk.

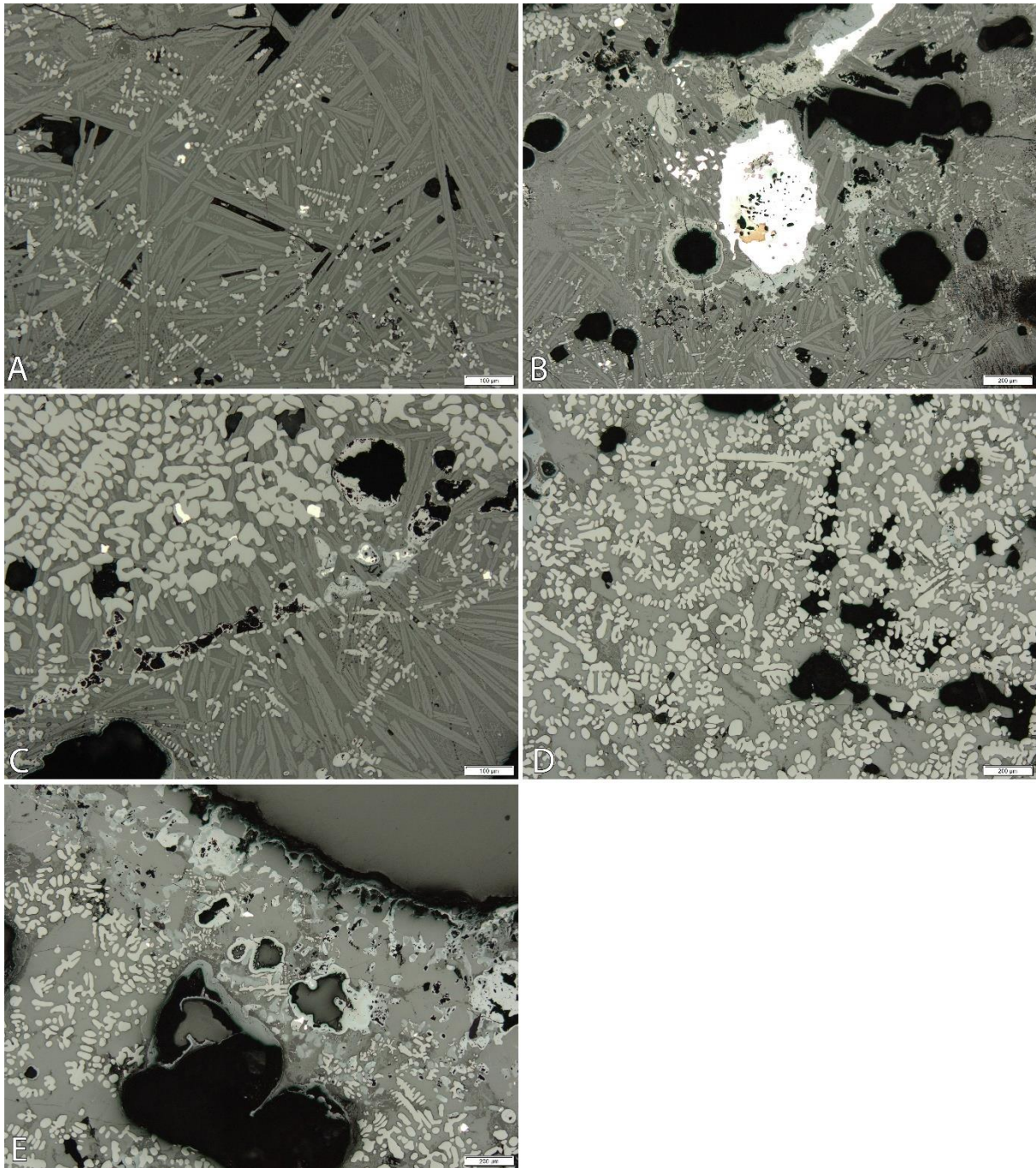


Foto 15. Patküla ML 150 mikrofotod. A – Fajaliit proovi alaosas; B – ferriidikogum alaosas; C – vüstiidi muutus keskosas; D – ühtlane fajaliit ja vüstiit keskosas; E – ülaosa.

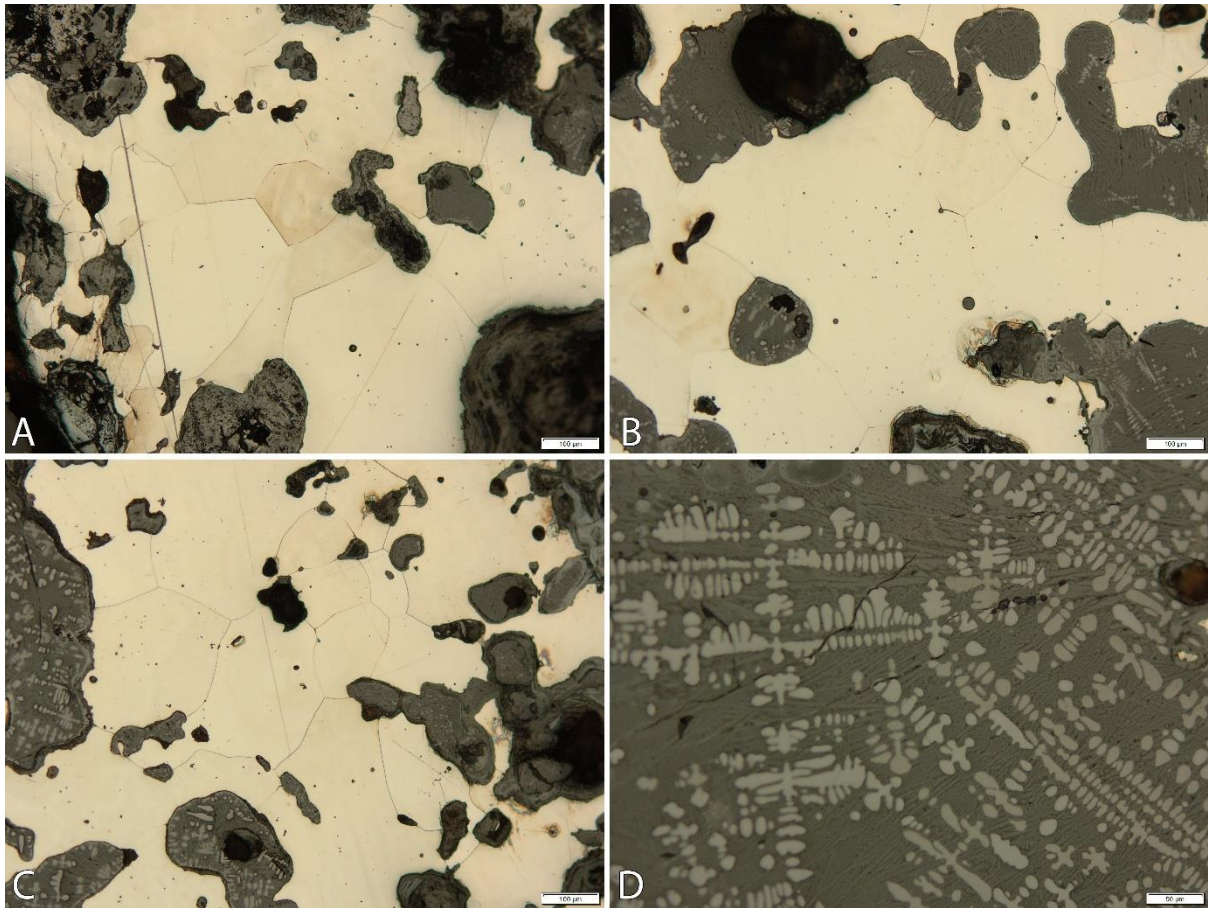


Foto 16. Aa ML 27 mikrofotod: A–C – süsinikuvaba ferriit; D – šlakk.

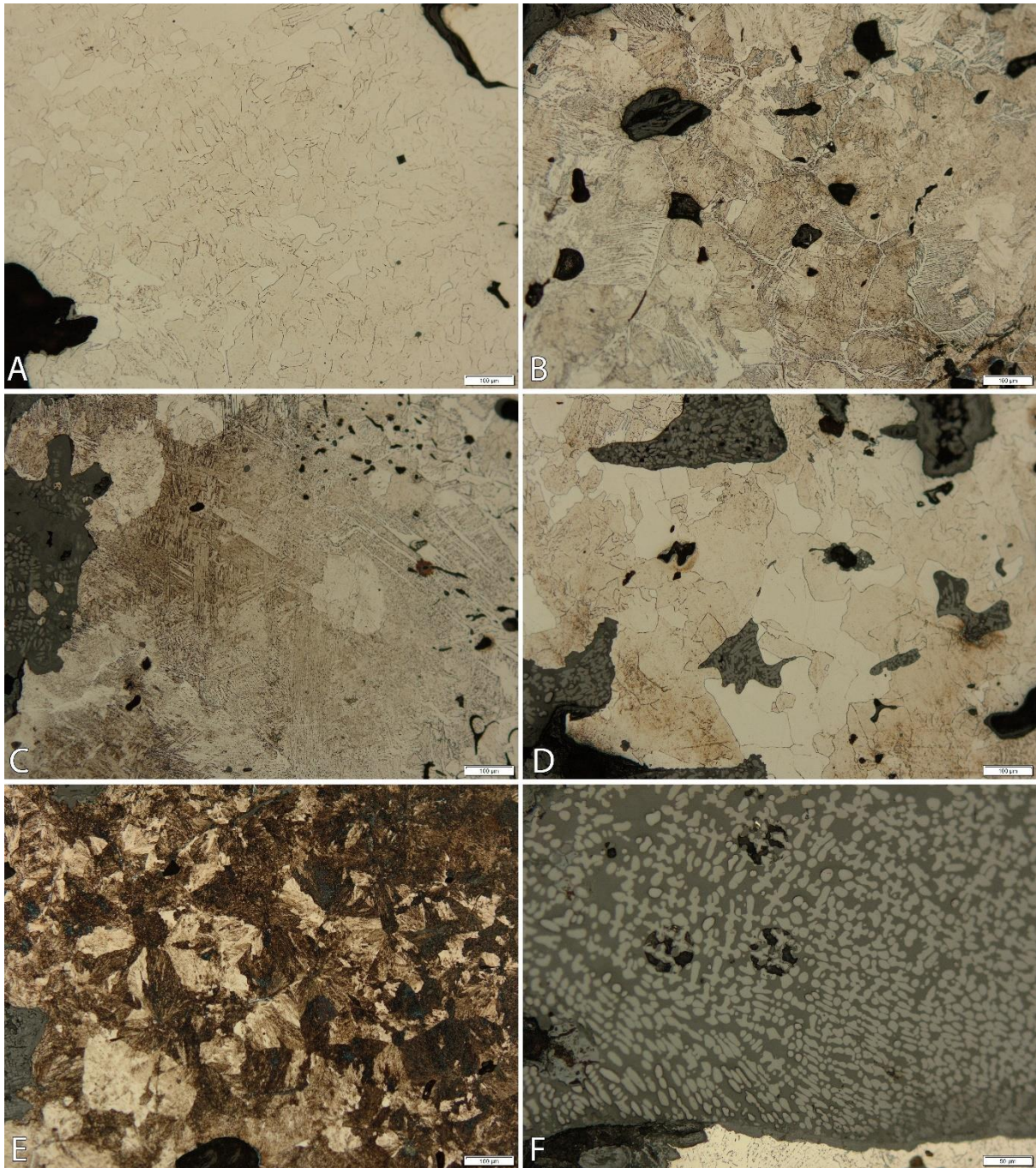


Foto 17. Alulinna ML 15 mikrofotod: A – keskmise terasuusega ferriit; B – Widmanstätteni ferriit; C – martensiit; D – ferriit ja šlakk; E – termotööteldud struktuur; F – šlakk.

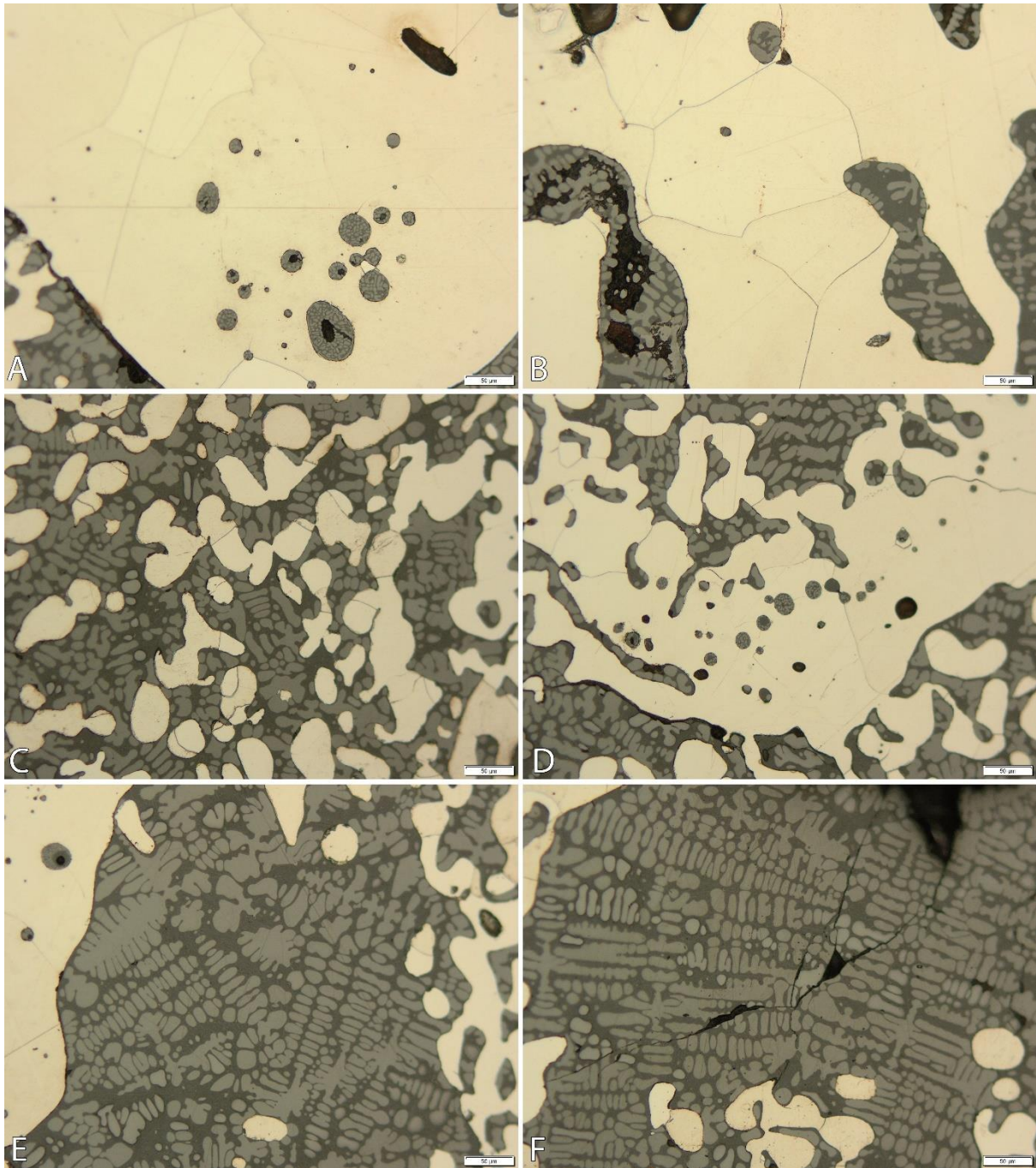


Foto 18. Varja ML 28 mikroftod: A–B – süsinikuvaba ferriit; C–D – ferriidiosakesed šlakis ja vastupidi; E–F – šlakk.

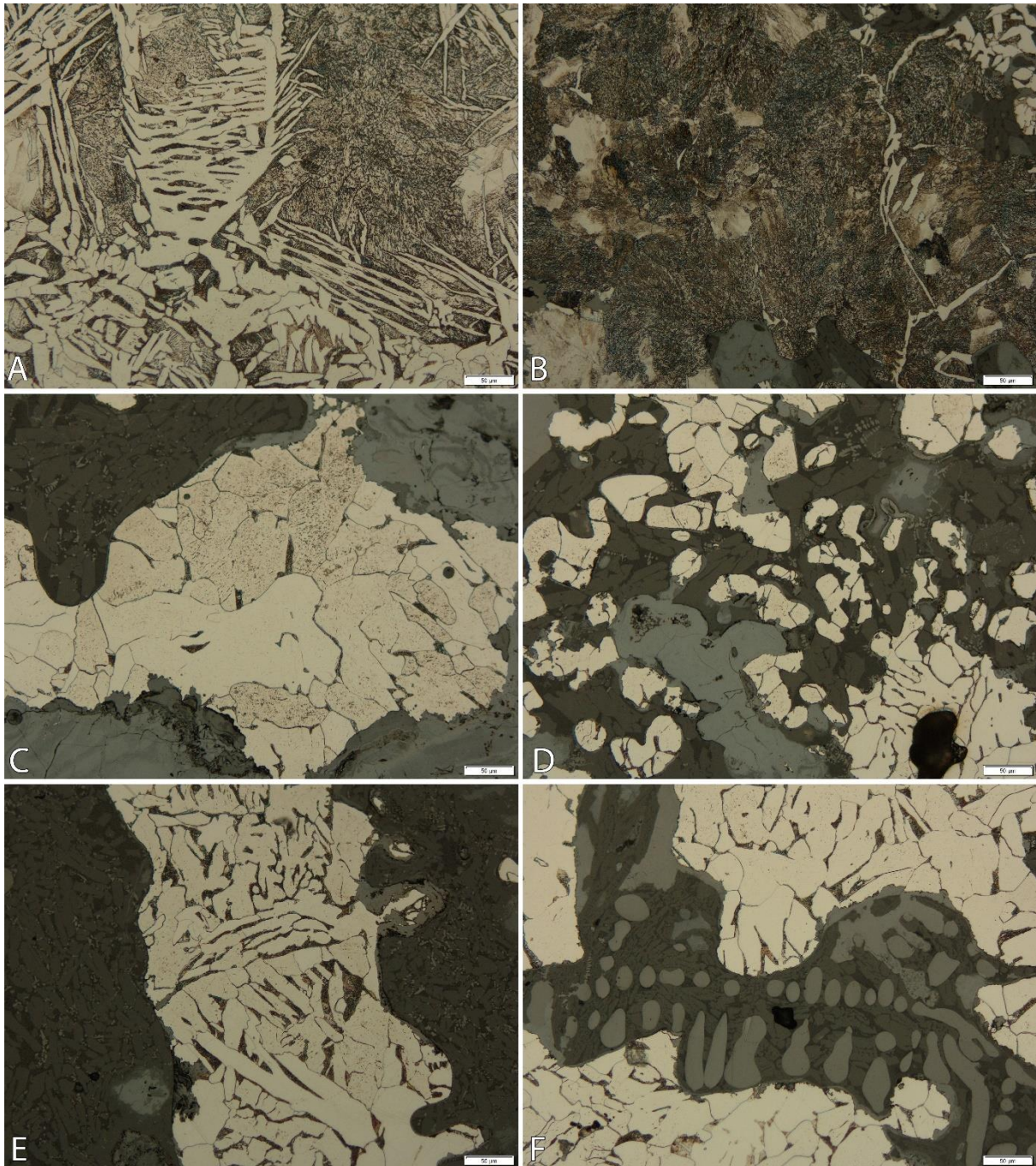


Foto 19. Metsamägara ML 7 mikrofotod: A – Widmanstätteni ferriit; B – üleeutektoidne teras; C–F – ferriit ja perliit; F – šlakk.

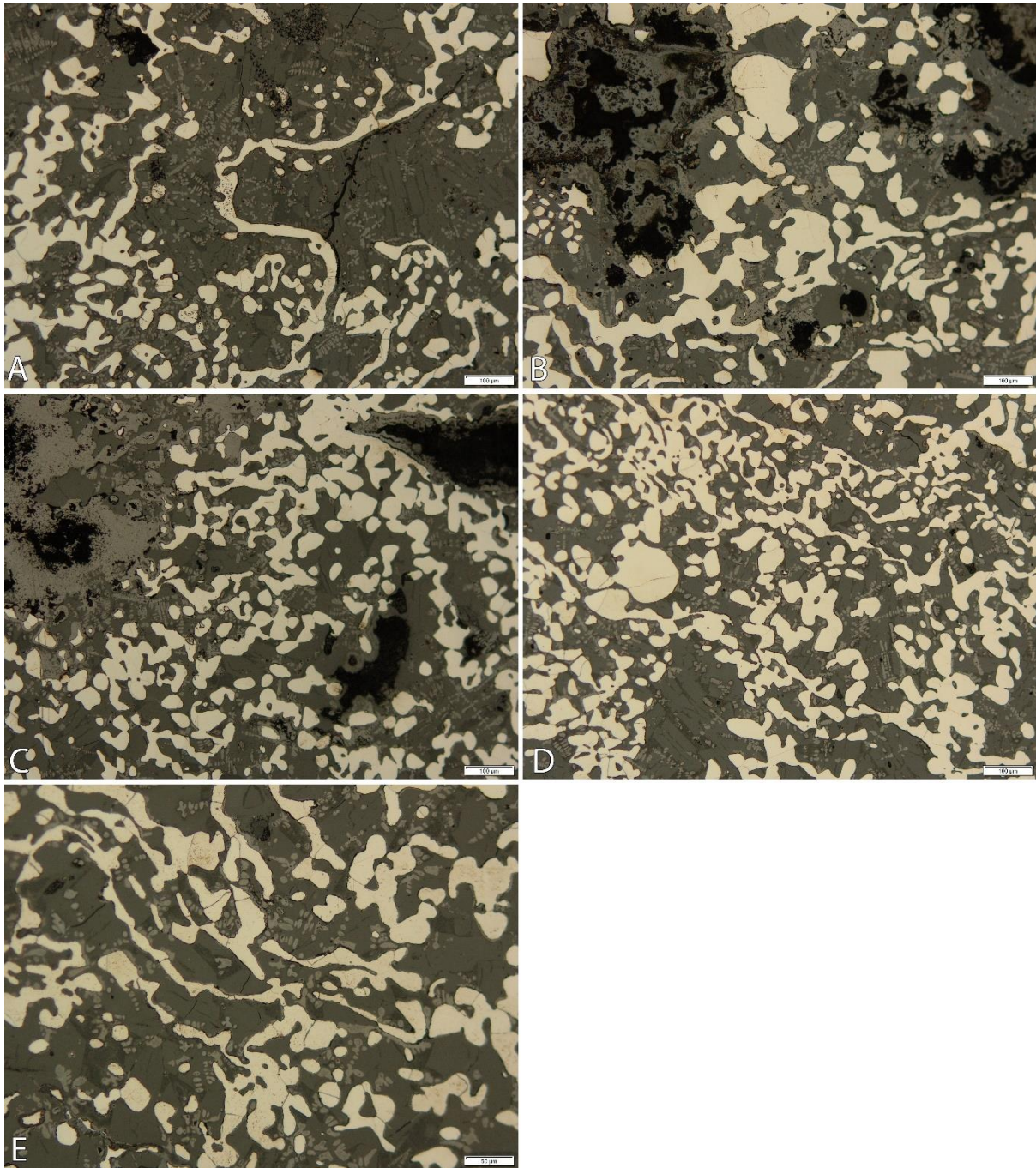


Foto 20. Praaga ML 19 mikrofotod: A–E – ferriidiosakesed šlakis.

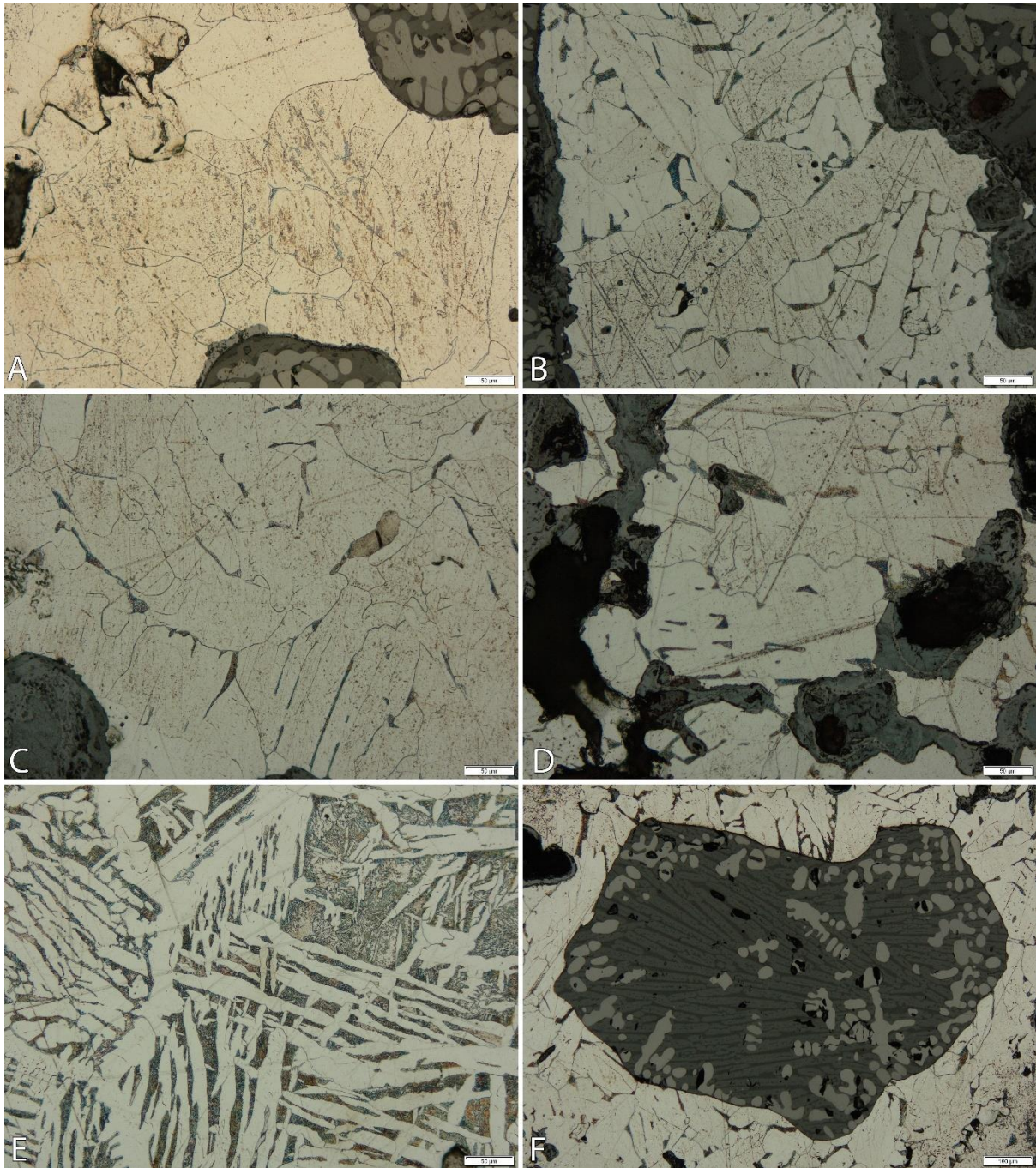


Foto 21. Ollepa ML 25 mikrofotod: A – süsinikuvaba ferriit; B–D – ferriit ja perliit; E – Widmanstätteni ferriit; F – šlakk.

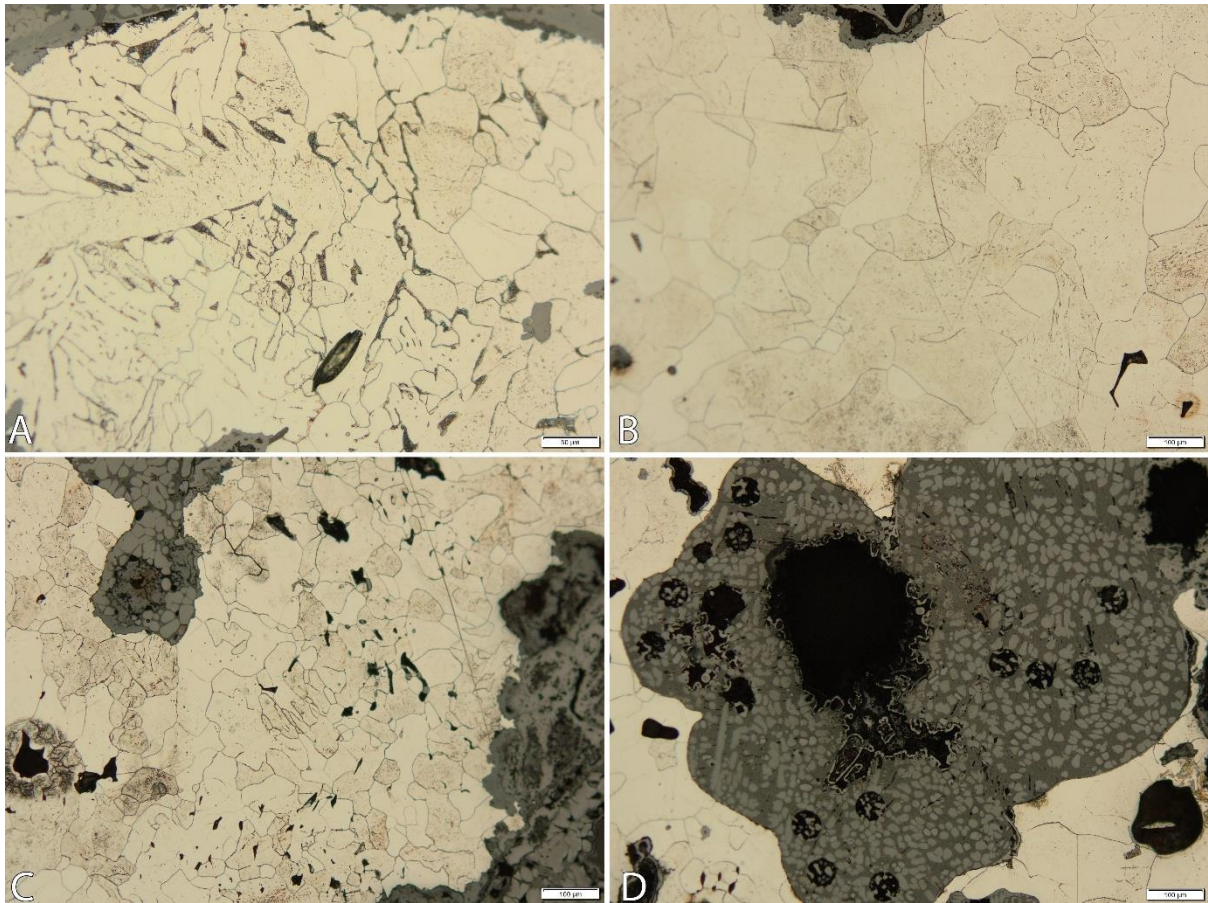


Foto 22. Sürgavere ML 31 mikrofotod: A – ferriit ja perliit; B–C – süsinikuvaba ferriit; D – šlakk.

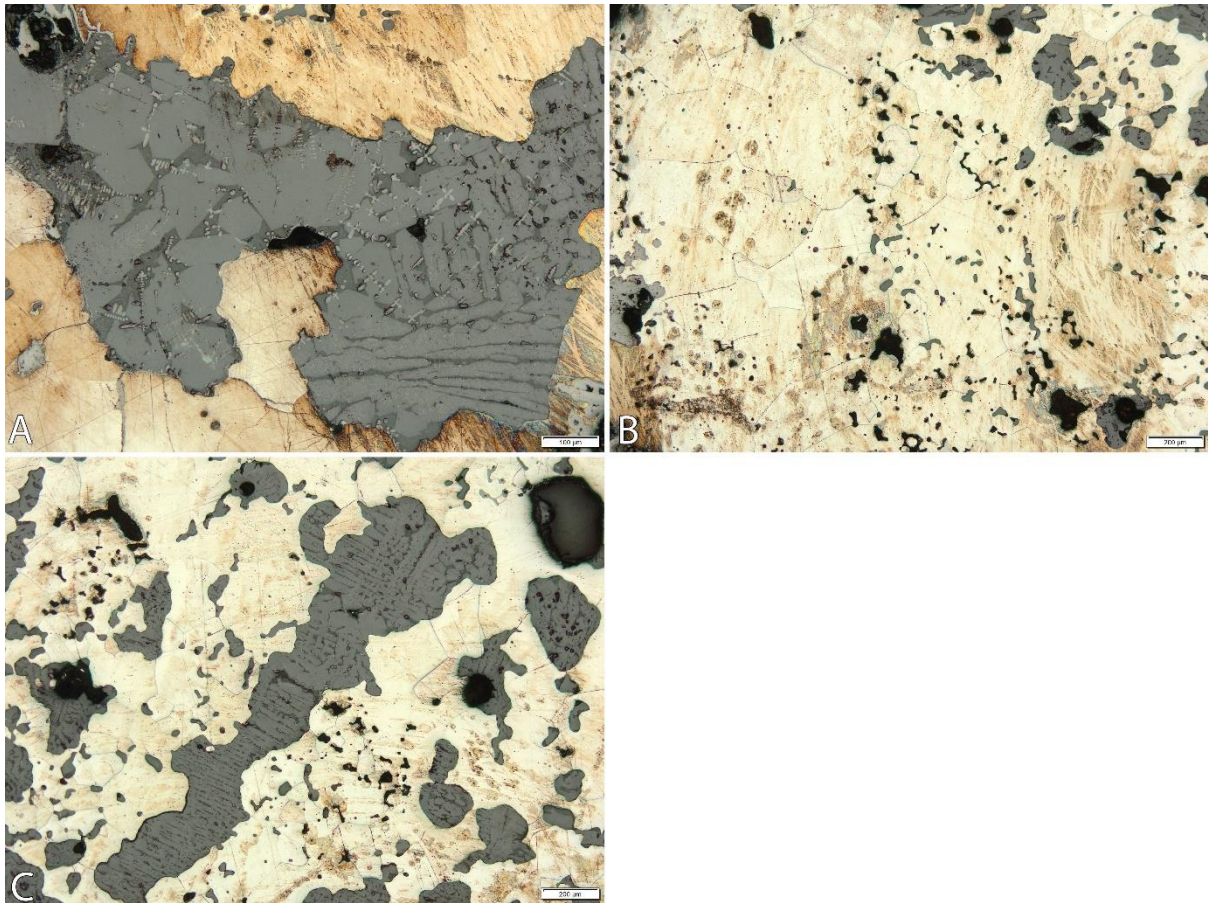


Foto 23. Tindimurru ML 147 mikroftod: A, C – süsinikuvaba ferriit ja šlakk; B – süsinikuvaba ferriit ja poorid.

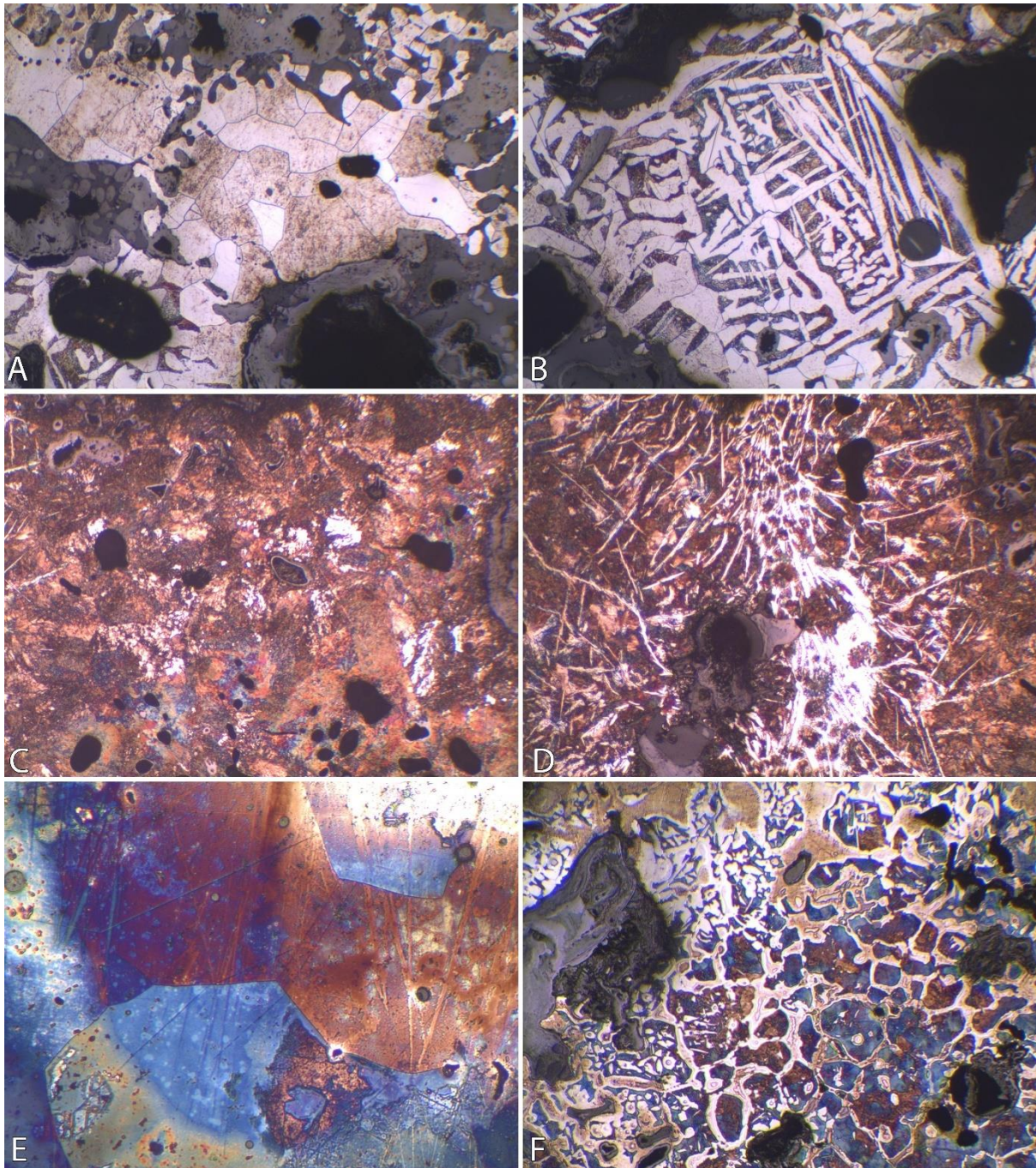


Foto 24. Rihula toorraudade mikrofotod. ML 106: A – süsinikuvaba ferriit, B – Widmanstätteni ferriit; ML 104: C – eutektoidne teras, D – üleutektoidne teras; ML 107: E – P-sisaldusega süsinikuvaba ferriit, F – alaeutektoidne teras ja P-sisaldusega ferriit.

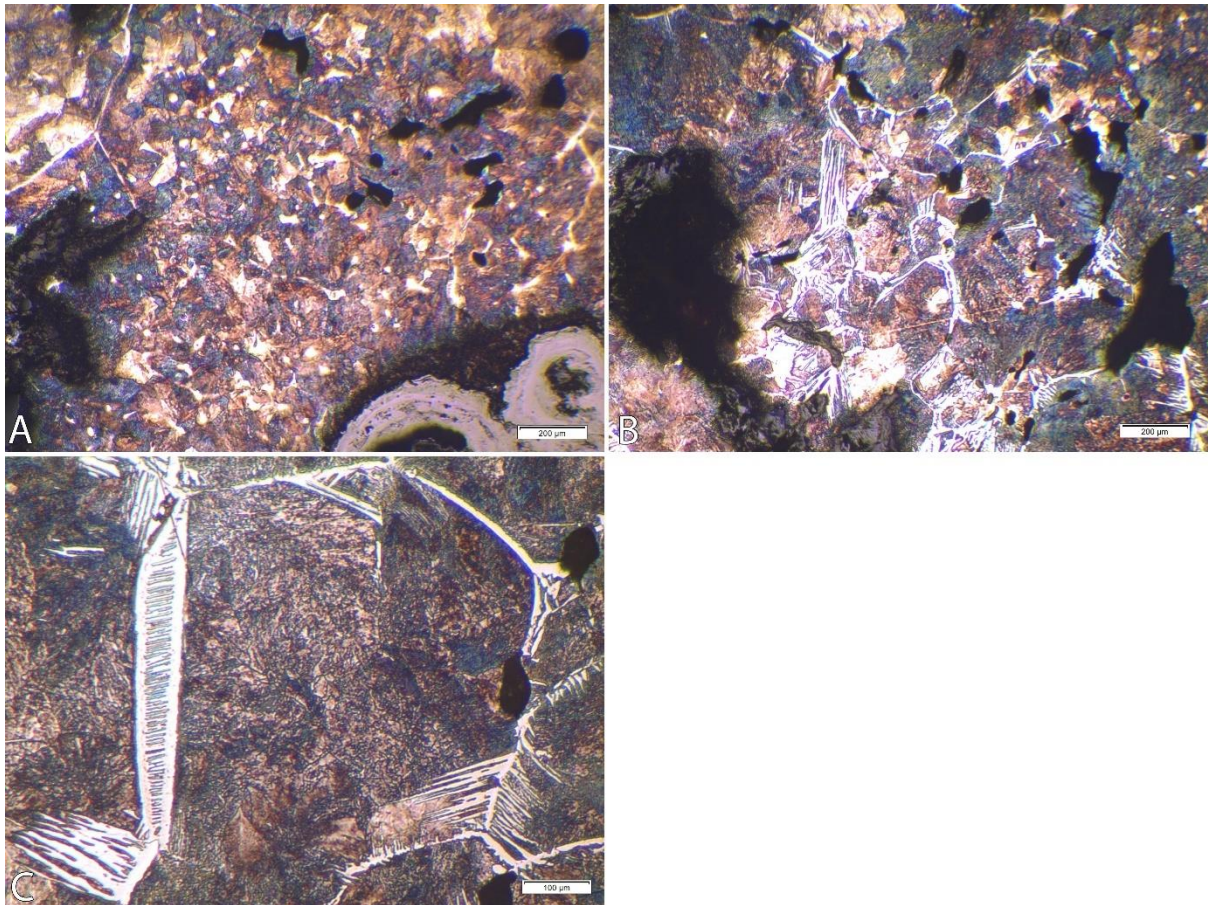


Foto 25. Tuiu ML 110 mikrostruktuur: A – eutektoidne teras; B–C – üleeutektoidne teras.



Foto 26. Maagi röstimine tuleriidal Karula 2024 eksperimendi ajal. Foto: Ragnar Saage.



Foto 27. Ahju ehitamine Karula 2024 eksperimendil kohaliku kogukonna osalusel. Foto: Marie-Anna Blehner.



Foto 28. Lohkääs Rookse 2023 eksperimendil.



Foto 29. Rauda sulatamine Karula 2024 eksperimendil. Foto: Matasha Mazis.



Foto 30. Šlaki väljalaskmine Karula 2024. eksperimendil. Foto: Matasha Mazis.



Foto 31. Ahi peale ja raua väljavõtmist Rookse 2023 eksperimendil. Foto: Agnes Unt.



Foto 32. Poorse käsraua esmane sepistamine alasikivil Rookse eksperimendil 2023. aastal.



Foto 33. Rookse 2023 eksperimendil valminud 5,2 kg raskune poolsfääriline rauatoorik (vasakul) võrrelduna Praaga poolsfäärilise kaubatoorikuga.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kristo Oks ,
(*autori nimi*)

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

Eesti muistne rauatootmine: paigad, toodang ja protsess ,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on PhD Ragnar Saage ,
(*juhendaja nimi*)

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi 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.

Kristo Oks

13.05.2025