

Močvarna željezna ruda - eksperimentalno testiranje utjecaja prženja rude na postupak taljenja i krajnji proizvod

Karavidović, Tena

Source / Izvornik: **Annales Instituti Archaeologici, 2020, XVI, 143 - 152**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:291:325538>

Rights / Prava: [Attribution 3.0 Unported/Imenovanje 3.0](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



INSTITUT ZA
ARHEOLOGIJU

Repository / Repozitorij:

[RIARH - Repository of the Institute of archaeology](#)



Annales

Instituti

Archaeologici

XVI - 2020

Godišnjak

*Instituta za
arheologiju*

Nakladnik/Publisher

INSTITUT ZA ARHEOLOGIJU
INSTITUTE OF ARCHAEOLOGY

Adresa uredništva/Editor's office address

Institut za arheologiju/Institute of Archaeology
HR-10000 Zagreb, Ulica Ljudevita Gaja 32
Telefon/phone 385 (0) 1 6150250
fax 385 (0) 1 6055806
e-mail: iarh@iarh.hr
http://www.iarh.hr

Glavni i odgovorni urednik/Editor in chief

Marko Dizdar

Uredništvo/Editorial board

Katarina Botić, Hrvoje Kalafatić, Ana Konestra, Siniša Krznar, Andreja Kudelić, Bartul Šiljeg, Asja Tonc, Marina Ugarković, Mario Gavranović (Austrija), Boštjan Laharnar, Alenka Tomaž (Slovenija), Vesna Bikić, Perica Špehar (Srbija), Miklós Takács (Mađarska)

Izdavački savjet/Editorial committee

Jura Belaj, Marko Dizdar, Saša Kovačević, Goranka Lipovac Vrkljan, Daria Ložnjak Dizdar, Branka Migotti, Ivana Ožanić Roguljić, Ante Rendić Miočević, Tajana Sekelj Ivančan, Tihomila Težak Gregl, Tatjana Tkalčec, Željko Tomičić, Ante Uglešić, Snježana Vrdoljak

Lektura/Language editor

Ivana Majer i Marko Dizdar (hrvatski jezik/Croatian)

Prijevod na engleski/English translation

Marko Maras, Kristina Deskar i autori / Marko Maras, Kristina Deskar and authors

Korektura/Proofreaders

Katarina Botić

Dizajn/Design

REBER DESIGN

Računalni slog/Layout

Hrvoje Jambrek

©Institute of archaeology, Zagreb 2020.

Annales Instituti Archaeologici uključeni su u indeks/
Annales Instituti Archaeologici are included in the index:
Clarivate Analytics services – Emerging Sources Citation Index
SciVerse Scopus – Elsevier, Amsterdam

Ovaj rad licenciran je pod Creative Commons Attribution By 4.0 međunarodnom licencom /
This work is licenced under a Creative Commons Attribution By 4.0 International Licence



SADRŽAJ

Arheološka istraživanja

- 8** **Andrea Rimpf**
Anita Rapan Papeša
Marko Dizdar
- Rezultati zaštitnih istraživanja kasnoavarodobnoga groblja Šarengrad – Klopare 2019. godine
- 18** **Marko Dizdar**
- Rezultati istraživanja u Lovasu (zapadni Srijem) 2019. godine – Kasnohalštatsko i ranolatensko groblje
- 31** **Daria Ložnjak Dizdar**
Marko Dizdar
- Prilog poznavanju topografije Sotina (*Cornacum*) u rimsko doba
- 39** **Boris Kratofil**
Marko Dizdar
Hrvoje Vulić
- Zaštitno arheološko istraživanje rimskodobnoga tumula 1 u Starim Jankovcima 2017.–2019. godine
- 54** **Katarina Botić**
- Kasnoneolitičko naselje Bršadin – Pašnjak pod selom, krono-stratigrafski prikaz tri sezone arheoloških istraživanja
- 71** **Ivana Ožanić Roguljić**
Bartul Šiljeg
Hrvoje Kalafatić
- Prilog poznavanju topografije teritorija kolonije Elije Murse unutar dnevne zone kretanja (*cotidianus excursus*)
- 78** **Dženi Los**
- Rezultati zaštitnih arheoloških istraživanja lokaliteta AN 6 Hermanov vinograd 1 na trasi južne obilaznice grada Osijeka
- 90** **Dženi Los**
- Rezultati arheološkoga istraživanja lokaliteta AN 2 Beli Manastir – Popova Zemlja
- 103** **Saša Kovačević**
- Nova Bukovica – Sjenjak 2019. godine

CONTENTS

Archaeological Excavations

- 8** **Andrea Rimpf**
Anita Rapan Papeša
Marko Dizdar
- The results of the rescue excavations of the Late Avar Age cemetery of Šarengrad – Klopare in 2019*
- 18** **Marko Dizdar**
- Research results in Lovas (Western Sirmia) in 2019 – The Late Hallstatt and the Early La Tène cemetery*
- 31** **Daria Ložnjak Dizdar**
Marko Dizdar
- A contribution to the understanding of the topography of Sotin (Cornacum) in Roman period*
- 39** **Boris Kratofil**
Marko Dizdar
Hrvoje Vulić
- Rescue archaeological excavations of the Roman age tumulus 1 in Stari Jankovci in 2017–2019*
- 54** **Katarina Botić**
- Late Neolithic settlement Bršadin – Pašnjak pod selom, chronostratigraphic sequence of three seasons of archaeological research*
- 71** **Ivana Ožanić Roguljić**
Bartul Šiljeg
Hrvoje Kalafatić
- Contribution to the topography of the territory of the colony Aelia Mursa within the daily movement zone (cotidianus excursus)*
- 78** **Dženi Los**
- Results of the rescue archaeological excavations of the site AN 6 Hermanov Vinograd 1 on the southern bypass route of the city of Osijek*
- 90** **Dženi Los**
- Results of the archaeological excavations of the site AN 2 Beli Manastir – Popova Zemlja*
- 103** **Saša Kovačević**
- Nova Bukovica – Sjenjak in 2019*

108 Marko Dizdar

Rezultati istraživanja groblja latenske kulture Zvonimirovo – Veliko polje u 2019. godini

108 Marko Dizdar

Research results of the La Tène culture cemetery at Zvonimirovo – Veliko polje in 2019

**114 Daria Ložnjak Dizdar
Marko Dizdar
Mario Gavranović
Marija Mihaljević**

Dolina na Savi – istraživanje naselja 2019. godine i osvrt na korištenje krajolika uz Savu u kasnome bronzanom dobu

**114 Daria Ložnjak Dizdar
Marko Dizdar
Mario Gavranović
Marija Mihaljević**

Dolina na Savi – Excavations of the settlement in 2019 and an overview of the use of landscape along the River Sava in the Late Bronze Age

122 Juraj Belaj

O arheološkim istraživanjima ivanovačke kapele na lokalitetu Pakrac – Stari grad 2019. godine

122 Juraj Belaj

On the archaeological excavations of the chapel of the Knights Hospitaller at the site of Pakrac – Stari Grad in 2019

**135 Branko Mušič
Barbara Horn
Filip Matijević
Ivan Valent
Tajana Sekelj Ivančan**

Geofizička istraživanja arheoloških nalazišta s pretpostavljenom željezarskom djelatnošću na primjeru lokaliteta Bakovčice, Nadbarice i Ždala

**135 Branko Mušič
Barbara Horn
Filip Matijević
Ivan Valent
Tajana Sekelj Ivančan**

Geophysical research of archaeological sites with presumed iron-working activity on the example of the sites of Bakovčice, Nadbarice, and Ždala

143 Tena Karavidović

Močvarna željezna ruda – eksperimentalno testiranje utjecaja prženja rude na postupak taljenja i krajnji proizvod

143 Tena Karavidović

Bog iron ore – experimental testing of the impact of ore roasting on the melting process and the end product

153 Saša Kovačević

Zaštitna arheološka istraživanja tumula 1 – Gomile u Jalžabetu u 2019. godine

153 Saša Kovačević

Rescue archaeological excavations of tumulus 1 – Gomila in Jalžabet in 2019

159 Saša Kovačević

IRON-AGE-DANUBE INTERREG DTP 2019. u Jalžabetu: Od istraživanja i očuvanja do prezentacije i održive uporabe arheoloških spomenika, lokaliteta i krajolika

159 Saša Kovačević

IRON-AGE-DANUBE INTERREG DTP 2019 in Jalžabet: From research and preservation to the presentation and sustainable use of archaeological monuments, sites, and landscapes

**163 Luka Štefan
Sebastijan Stingl
Tomislav Čanković
Jelena Maslač
Sanja Sekulić
Maja Mrvelj**

Topografija i reambulacija Žumberačkoga gorja

**163 Luka Štefan
Sebastijan Stingl
Tomislav Čanković
Jelena Maslač
Sanja Sekulić
Maja Mrvelj**

Topography and revision of the Žumberak range

- | | |
|---|---|
| <p>180 Andreja Kudelić
Nikolina Bencetić
Snježana Vrdoljak</p> | <p>180 Andreja Kudelić
Nikolina Bencetić
Snježana Vrdoljak</p> |
| <p>Kasno brončano i rano željezno doba na gradini Crkvišće – Bukovlje</p> | <p><i>Late Bronze and Early Iron Age at the hillfort of Crkvišće – Bukovlje</i></p> |
| <p>201 Gaetano Benčić
Ana Konestra
Enrico Cirelli</p> | <p>201 Gaetano Benčić
Ana Konestra
Enrico Cirelli</p> |
| <p>Stari Tar/Tarovec (St. Blek, Tar) – pokušaj tipološke i funkcionalne interpretacije sakralnoga sklopa unutar srednjovjekovnoga naselja</p> | <p><i>Stari Tar/Tarovec (St. Blek, Tar) – attempt at a typological and functional interpretation of the sacral complex within the medieval settlement</i></p> |
| <p>219 +Tihomir Percan
James C. M. Ahern
Darko Komšo
Siniša Radović
Mario Novak
Katarina Gerometta
Lia Vidas
Ivor Janković</p> | <p>219 +Tihomir Percan
James C. M. Ahern
Darko Komšo
Siniša Radović
Mario Novak
Katarina Gerometta
Lia Vidas
Ivor Janković</p> |
| <p>Istraživanja u Ljubićevoj pećini kraj Marčane u sezoni 2020.</p> | <p><i>Excavations in Ljubićevo Pećina near Marčana in the 2020 season</i></p> |
| <p>229 Ana Konestra
Fabian Welc
Paula Androić Gračanin
Kamil Rabięga
Bartosz Nowacki
Agnese Kukela</p> | <p>229 Ana Konestra
Fabian Welc
Paula Androić Gračanin
Kamil Rabięga
Bartosz Nowacki
Agnese Kukela</p> |
| <p>Tipologija i organizacija otočnih naselja Raba kroz dijakronijski pristup – Prvi podaci multidisciplinarnih istraživanja</p> | <p><i>Rab island settlement typology and organisation through a diachronic approach – First data from a multidisciplinary research</i></p> |
| <p>245 Lujana Paraman
Marina Ugarković
Martin Steskal</p> | <p>245 Lujana Paraman
Marina Ugarković
Martin Steskal</p> |
| <p>Terenski pregled i dokumentiranje gradinskih nalazišta na širem trogirskom području u 2019. godini kao uvod u sustavno istraživanje Hiličkoga poluotoka</p> | <p><i>Field survey and documenting of hillfort sites in the wider Trogir area in 2019 as an introduction to a systematic research of the Hyllean peninsula</i></p> |
| <p>269 Maja Zeman
Ana Marinković
Ivana Ožanić Roguljić
Marina Šiša Vivek
Suzana Damiani</p> | <p>269 Maja Zeman
Ana Marinković
Ivana Ožanić Roguljić
Marina Šiša Vivek
Suzana Damiani</p> |
| <p>Preliminarna analiza rezultata aktivnosti istraživačko-edukacijskoga projekta Otkrivanje starih dubrovačkih katedrala (2018.–2020.)</p> | <p><i>Preliminary analysis of activity results for the research and educational project Discovering the Old Dubrovnik Cathedrals (2018–2020)</i></p> |

Kratki izvještaji o istraživanjima

283-301

Short field reports

283-301

**Ostala znanstvena djelatnost
Instituta za arheologiju**

302-314

**Additional scientific activity of the
Institute**

302-314

Arheološka istraživanja

Archaeological Excavations



1. Šaregrad – Klopare
2. Lovas – Ulica A. Starčevića
3. Sotin
4. Stari Jankovci – Jankovačka Dubrava
5. Bršadin – Pašnjak pod selom
6. Osijek
7. Osijek – Hermanov vinograd
8. Beli Manastir – Popova zemlja
9. Nova Bukovica – Sjenjak
10. Zvonimirovo – Veliko polje
11. Dolina – Babine Grede
12. Pakrac – Stari grad
13. Ždala – Telek
14. Virje – Sušine i Volarski breg
15. Bakovčice – Velike livade 1 i Nadbarice 1
16. Hlebine – Velike Hlebine i Dedanovice
17. Jalžabet – Gomila
18. Žumberačko gorje
19. Bukovlje – Crkvišće
20. Tar – Stancija Blek
21. Marčana – Ljubićeva pećina
22. Rab – Lopar
23. Trogir
24. Dubrovnik

Močvarna željezna ruda – eksperimentalno testiranje utjecaja prženja rude na postupak taljenja i krajnji proizvod

Bog iron ore – experimental testing of the impact of ore roasting on the smelting process and the end product

TENA KARAVIDOVIĆ
Institut za arheologiju
Ulica Ljudevita Gaja 32
HR-10000 Zagreb
tkaravidovic@iarh.hr

Primljeno/Received: 21. 05. 2020.
Prihvaćeno/Accepted: 12. 06. 2020.

Dosadašnja istraživanja lokaliteta s prostora Podravine na kojima su se odvijale aktivnosti vezane uz proizvodnju željeza (Hlebine – Velike Hlebine i Dedanovice, Virje – Sušine i Volarski breg) ukazala su da je močvarna željezna ruda lokalnoga podrijetla bila temeljna sirovina za proizvodnju željeza tijekom kasne antike i ranoga srednjeg vijeka. Na osnovi mineraloških analiza uzoraka rude (XRD) pretpostavljene su razlike u načinu priprema ruda za taljenje koje su vidljive između lokaliteta različite vremenske i prostorne pripadnosti. Eksperiment prikazan u ovome radu je osmišljen kako bi se testirala jedna varijanta idejne rekonstrukcije talioničkih peći te različit način pripreme rude u svrhu usporedbe utjecaja ove varijable na postupak taljenja i krajnji proizvod. Talionička peć rekonstruirana je na osnovi podataka s arheoloških istraživanja i obrade nalaza, a pripada tipu samostojećih peći s vratima, kod kojih se u tijeku postupka ispuštala zgura. Izvedena su dva eksperimentalna taljenja u rekonstruiranoj peći, koristeći rudu sa i bez pirometalurške pripreme, prženja.

Ključne riječi: proizvodnja željeza, spužvasto željezo, močvarna željezna ruda, prženje rude, talionička peć, eksperimentalna arheologija

Earlier research of the sites in the Podravina region where iron production activities took place (Hlebine – Velike Hlebine and Dedanovice, Virje – Sušine, and Volarski Breg) indicated that bog iron ore of local origin was the basic raw material for iron production in Late Antiquity and the Early Middle Ages. On the basis of mineralogical analyses of ore samples (XRD), differences in the method of preparing ore for smelting were identified between sites from different periods and spatial distribution. The experiment presented in this paper was designed to test one variant of the conceptual reconstruction of smelting furnaces and different methods of ore preparation in order to compare the impact of this variable on the smelting process and the end product. The smelting furnace was reconstructed on the basis of data from archaeological research and the analysis of finds; it belongs to the type of free-standing shaft furnaces with a door where slag is tapped during the procedure. Two smelting experiments were carried out in the reconstructed furnace, using the ore with and without the pyrometallurgical preparation, roasting.

Key words: iron production, iron bloom, bog iron ore, ore roasting, smelting furnace, experimental archaeology

UVOD

Tijekom 2019. godine u sklopu aktivnosti projekta TransFER – *Proizvodnja željeza uz rijeku Dravu u antici i srednjem vijeku: stvaranje i transfer znanja, tehnologija i roba (IP-06-2016-5047)* osmišljen je i proveden niz eksperimenata u vezi s proizvodnjom željeza putem tzv. postupka direktne redukcije u rekonstrukcijama talioničkih peći te obradi dobivenoga proizvoda, spužvastoga željeza u željezo. Eksperimenti su provedeni u okviru radionica organiziranih u Adamovu (Republika Češka),¹ Somogyfajs-z-u (Republika Mađarska)² i Koprivnici (Republika Hrvatska) te tijekom održavanja Renesansnoga festivala, u skladu sa znanstvenim standardima (Kettleborn 1987: 11–12) koji podrazumijevaju ciljano osmišljavanje eksperimenta, odnosno jasno postavljene ciljeve i istraživačka pitanja, mjerljivost, ponovljivost te zadovoljavajuću razinu iskustva dionika. Osmišljeni su kako bi se:

- razumjeli postupci vezani uz pripremu i odabir sirovina (ruda, drvo, ugljen, glina);
- testirale varijacije idejnih rekonstrukcija talioničkih peći i varijacije u postupcima pri taljenju;
- analizirao nastali otpad i zapis;
- rezultati usporedili s arheološkim nalazima i zapisom.
- Dodatno se promatrao utrošak resursa (ljudskih i sirovinskih, kao i utrošak vremena) te napravila procjena odnosa količine i svojstva sirovina naspram finalnoga proizvoda.

U ovom će se radu predstaviti dio eksperimenata vezan uz karakteristike močvarnih željeznih ruda pronađenih na arheološkim lokalitetima na prostoru Podravine na kojima su potvrđene aktivnosti vezane uz proizvodnju željeza tijekom kasne antike i ranoga srednjeg vijeka.

METODE I CILJEVI

Prema rezultatima mineraloških analiza ulomaka ruda (XRD, *X-ray powder Diffraction*)³ pronađenih pri arheološkim istraživanjima lokaliteta s prostora Podravine na kojima su se odvijale metalurške aktivnosti, ustanovljeno je da postoje razlike u njihovome mineraloškom sastavu koje mogu upućivati na različiti način pripreme ruda za taljenje. Temeljne razlike se očituju među uzorcima s lokaliteta različite vremenske i prostorne pripadnosti te mogu upućivati na razlike u koracima pripreme sirovina koji prethode postupku taljenja. Prema mineraloškom sastavu moguće je zaključiti kako se kod svih pronađenih i analiziranih uzoraka s lokaliteta Virje – Volarski breg (N 113, 122, 130) i uzorka s lokaliteta Virje – Sušine (295/51) radi o uzorcima rude koja nije podvrgnuta termičkome tretmanu, odnosno postupku prženja, dok su uzorci s lokaliteta Hlebine – Velike Hlebine (N 223, N 242), Hlebine – Dedanovice (U – 11, 26, 45, 71) i Virje – Sušine (N 295/37 i 38, 315, 545, 631) vjerojatno bili prženi prije taljenja. Iz dosadašnjih istraživanja utvrđeno je kako je područje Podravine pogodno za formaciju močvarnih željeznih ruda (Sekelj Ivančan, Marković 2017; Brenko et al. 2019), a prema analiziranim uzorcima

ma u arheološkim su razdobljima iskorištavane močvarne željezne rude lokalnoga podrijetla. Postupci pripreme ruda mogu višestruko pozitivno utjecati na karakteristike ruda, odnosno njihovu povećanu pogodnost za direktnu redukciju (Cleere 1972: 208; Pleiner 2000: 107; Sauder, Williams 2002: 125; Espelund 2013: 85–87). Močvarne željezne rude u načelu se lako tale te postupak prženja nije nužno neophodan (Charlton et al. 2010: 365), stoga kao takav može predstavljati tehnološki odabir. S jedne strane prirodne karakteristike sirovina (rude, ugljena, tehničke keramike) uvelike određuju karakteristike spužvastoga željeza koje se proizvodi, no za uspješno taljenje određenih ruda od izrazitoga značaja je i optimalna konstrukcija peći te ostali elementi postupka poput njegova tijeka, zatim omjera rude i ugljena kao i ritma sagorijevanja ugljena te redukcije rude. Eksperiment prikazan u ovome radu osmišljen je kako bi se testirala jedna varijanta idejne rekonstrukcije talioničkih peći te različiti način pripreme rude u svrhu usporedbe utjecaja ove varijable na postupak taljenja i krajnji proizvod. Eksperimentalno testiranje je podrazumijevalo: (1) pripremu sirovina (ugljen, glina, ruda); (2) izgradnju peći za taljenje; (3) postupke taljenja; (4) postupke kompaktiranja spužvastoga željeza. U svrhu usporedbe i definiranja utjecaja između različite razine pripreme rude, u istoj su peći izvedena dva zasebna postupka u kojima je taljena ruda sa i bez pirometalurške pripreme (prženja), usitnjena na jednaku granulaciju (tab. 1). Ostali uvjeti (ritam upuhivanja zraka, veličina mijeha, svojstva ugljena) bili su isti kod oba taljenja.

Cjelokupni proces, od prikupljanja sirovina preko izgradnje i korištenja peći, dokumentiran je fotografski i opisno. Pomoću infracrvenoga termometra dokumentirane su temperature prženja rude na otvorenoj vatri (Karavidović 2020) te temperature vanjskih stijenki talioničkih peći, dok su temperature unutrašnjosti peći dokumentirane korištenjem sonde za uranjanje.⁴ Temperature unutrašnjosti peći (Položaj 2.1 – 6.1) zabilježene su na ukupno pet točaka postavljenih na različitu visinu duž prednje vertikalne stijenske peći, a izmjerene su i temperature gornjega dijela zapune peći (Položaj 1) tijekom cijelog postupka.⁵ Zabilježene su i temperature spužvastoga željeza po vađenju iz peći te temperatura tekuće zgure pri istjecanju, vrijeme trajanja pojedinih postupaka i količina utrošenih sirovina. Sav nastali otpad je makroskopski obrađen i dokumentiran korištenjem principa arheološke obrade sličnih nalaza te su prikupljeni referentni uzorci za daljnju mineralošku i geokemijsku analizu.

EKSPERIMENTALNO TESTIRANJE

Rekonstrukcija peći

Talionička peć rekonstruirana je na osnovi analize arheoloških ostataka peći na kasnoantičkim i ranosrednjovjekovnim lokalitetima Virje – Volarski breg (Sekelj Ivančan 2009; 2010; 2011; 2013; 2014a; 2014b; 2014c; 2016), Virje – Sušine (Sekelj Ivančan 2013; 2014a; 2014b; 2014c) i Hlebine – Velike Hlebine (Sekelj Ivančan, Valent 2017; Sekelj Ivančan 2018b) na prostoru Po-

1 11. workshop starého železářství / 11th workshop old ironmongery – Stará huť, Adamov, Brno (Češka), Technické muzeum v Brně, voditelj: Ondřej Merta.

2 11th iron smelting workshop 2019: from the soil to the iron product Somogyfajs, Republika Mađarska, voditelj: dr. sc. Adam Thiele.




3 Mineraloška analiza provedena je na Rudarsko-geološko-naftnome Fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, a izveo ju je mag. geol. Tomislav Brenko. Podaci se nalaze u neobjavljenome izvješću napravljenome za potrebe projekta TransFER (Brenko 2020).

4 Korišten je termometar Volcraft IR +2200–50D, optika 50:1, kalibriran prema: ISO. Sonda za uranjanje tip K, kalibrirano prema tvorničkom standardu (bez certifikata) do 1300 °C.

5 Temperature gornjega dijela zapune peći i dio temperatura kroz sapnicu (položaj 6.1. i 1.) su izmjerene infracrvenom metodom, dok su temperature unutar peći na točkama 2.1 – 5.1 zabilježene tek kao dio postupka s obzirom da se metalni nastavak pirometra istopio jer su postignute temperature iznad 1300 °C.



Eksperiment Experiment	Ruda / Ore				Ugljen / Charcoal			
	vrsta type	dimenzije dimensions	priprema preparation	količina quantity (kg)	vrsta type	dimenzije dimensions	priprema preparation	količina quantity (kg)
1	MŽR/BIO SOMOGY	4x2–2x2 cm	Isprana, pržena, usitnjena washed, roasted, crushed	12	BUKVA I GRAB beech and hornbeam	5x3/2 - 2x2 cm	usitnjen crushed	35.6
2	MŽR/BIO SOMOGY	4x2–2x2 cm	Isprana, osušena, usitnjena washed, dried, crushed	12	BUKVA I GRAB beech and hornbeam	5x3/2 - 2x2 cm	usitnjen crushed	40

Tab. 1 Prikaz vrsta, količine i načina pripreme sirovina za eksperimentalno taljenje (izradila: T. Karavidović)

Tab. 1 Overview of types, quantities, and methods of preparation of raw materials for experimental smelting (made by: T. Karavidović)

dravine. Na osnovi arheološkoga zapisa te karakterističnih nalaza koji pripadaju konstrukciji peći (tehnička keramika) i otpadu od taljenja (zgura), teoretski je moguće odrediti dimenzije i karakteristike ognjišta, debljinu i sustav gradnje stijenki peći i vrata te karakteristike i dimenzije sapnica. Međutim, s obzirom da nadzemni dio strukture peći nije sačuvan, visinu peći nije moguće sa sigurnošću odrediti. Čitava konstrukcija peći igra značajnu ulogu u uspješnosti postupka, a visina peći značajna je jer ruda u tijeku postupka, spuštajući se niz okno peći, prolazi kroz faze postepene redukcije, sukladno povećanju temperature. Funkcionalnost određene visine peći ovisna je o vrsti i karakteristikama rude, ali i željenim karakteristikama spužvastoga željeza na koje je do neke mjere moguće utjecati trajanjem postupka redukcije koji je, između ostalog, u izravnoj vezi s visinom nadzemne konstrukcije. Visina peći u ovome eksperimentu predodređena je prema nalazu urušene stijenke peći (Sekelj Ivančan 2009: 66, bilj. 4),⁶ rezultatima prethodno provedenih eksperimenata (Sekelj Ivančan 2018a), podataka o očuvanim sličnim pećima (Pleiner 2000: 173–176) i eksperimentalnim taljenjima poznatim iz arheološke literature (Thiele 2010).

Za izgradnju peći korištena je ilovača lokalnoga podrijetla s prostora Podravine koja je umiješana s pijeskom u omjeru 3 : 1 u korist ilovače. Cilj stvaranja ovakve glinene smjese za izgradnju peći je imitacija građevnoga materijala kakav je korišten u arheološkim razdobljima, a ustanovljen je na temelju makroskopske analize tehničke keramike (stijenki peći) s prethodno spomenutih lokaliteta. Makroskopski su vidljive primjese pijeska/tinjca, no je li ovaj pijesak sastavni dio glina korištenih pri izradi peći ili je naknadno umiješan nije moguće zaključiti na ovoj razini istraživanja. Peć je građena redanjem valjaka oblikovanih od prethodno pripremljene glinene smjese. Redovi valjaka dobro su utisnuti te su vertikalnim povlačenjem uzduž stijenki dodatno međusobno povezani. Ovakav sustav gradnje nalikuje na izgradnju keramičkih posuda (eng. *coiling*). Tijekom izgradnje peći radene su pauze jer nije bilo moguće dizati konstrukciju kontinuirano zbog tendencije deformiranja stijenki peći. Utjecaj na deformiranje stijenki peći zasigurno je imao visok udio vlage u glinenoj smjesi. Također, peć je građena bez ikakve konstrukcije koja bi činila oslonac pri gradnji. Ova-

kav sustav gradnje primijenjen je jer tijekom arheoloških istraživanja i obrade nalaza nisu primijećeni tragovi pruča ili bilo kakve potporne konstrukcije, dok su tragovi valjkastih elemenata stijenki slaganih u redovima prepoznati pri makroskopskoj obradi stijenki peći sa svih spomenutih lokaliteta.

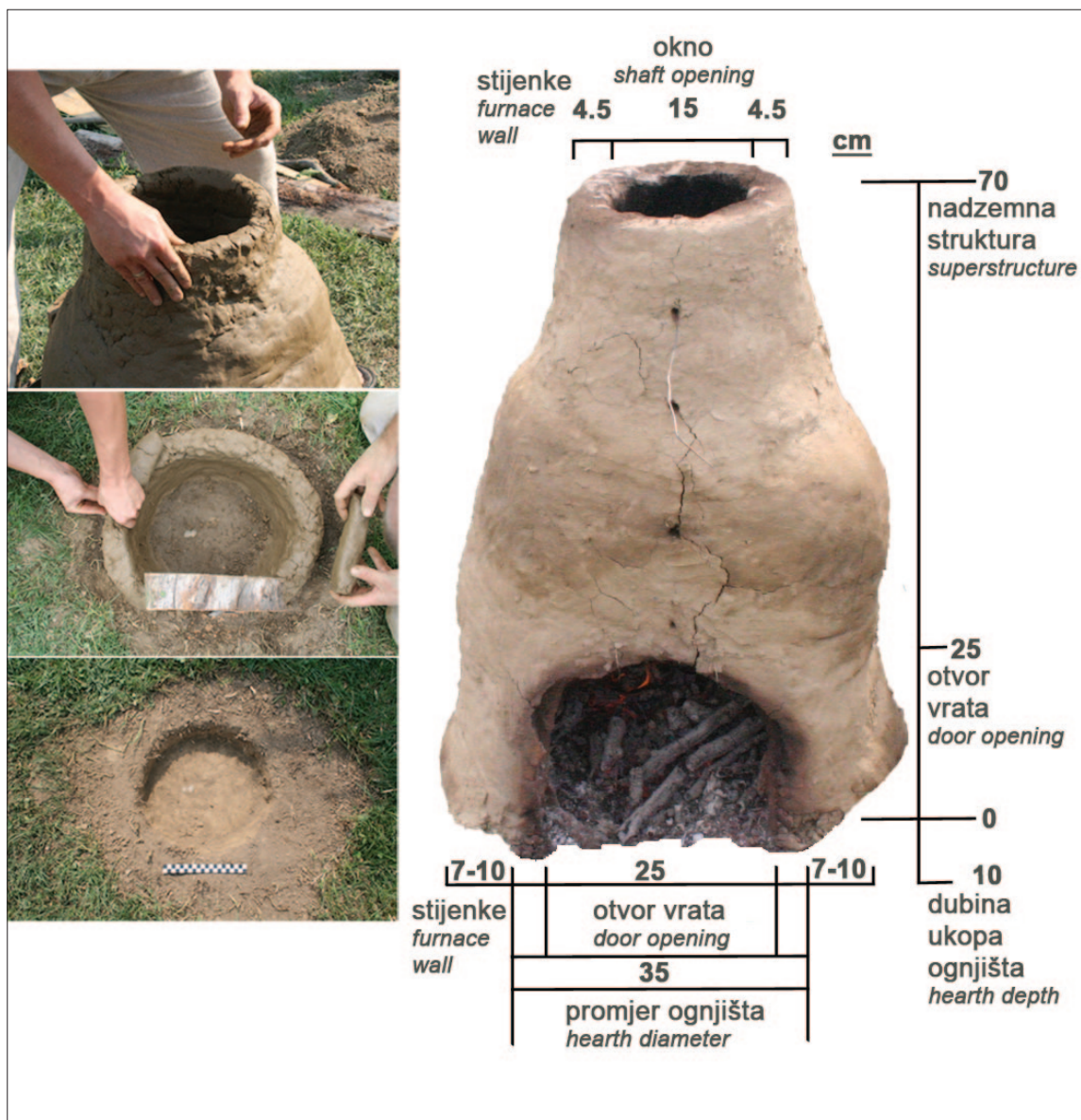
Rekonstruirana peć (sl. 1) pripada tipu samostojeće peći s tanjim stijenkama i ispuštenom zgurom (Cleere 1981: 57–59, Fig. 7/B1; Pleiner 2000: 172–176) koje karakterizira plitko udubljeno ili ravno ognjište iz kojega se tijekom postupka nakupljena zgura ispuštala izvan peći. Peći s mehanizmom istjecanja zgure pojavljuju se na području Europe tijekom mlađega željeznog doba te se upotrebljavaju sve do kasnoga srednjeg vijeka (Joosten 2004: 15). Bliske analogije ovome tipu peći potječu s nekoliko lokaliteta na prostoru okruga Győr – Sopron (sjeverozapadna Mađarska) i Somogy (južno od jezera Balaton). Radi se o tzv. avarskom i Nemesker tipu peći (Gömori 2000a: 327–328; 2000b) koje datiraju od 7. do 9. st. Na početku izgradnje u tlo je ukopana plitka jamica dubine 9–10 cm, promjera 35 cm. Debljina stijenki peći pri izgradnji varirala je između 5 i 6 cm pri dnu peći (prvih 30 cm visine) te 4–5 cm pri vrhu. Promjer otvora peći bio je 15 cm, a visina nadzemnoga dijela 70 cm, odnosno 80 cm ukupne visine unutrašnjosti (uključujući plitko ognjište), što je odgovaralo pretpostavljenim dimenzijama zabilježenim tijekom arheoloških iskopavanja lokaliteta Virje – Volarski breg (Sekelj Ivančan 2009; 2010). Na prednjem dijelu ostavljen je otvor relativno pravilnoga oblika za vrata sa sapnicom koja su umetnuta nakon sušenja konstrukcije. Vrata su načinjena iz iste glinene smjese kao i stijenke peći, ali iz jednoga dijela (dim: 25 x 25 cm). Sapnice su postavljene kod oba taljenja blago ukoso (prema ložištu) na približno jednaku visinu, oko 10–11 cm od dna vrata, što uzevši u obzir jamicu u ložištu čini ukupno cca 20 cm od dna ložišta. Sve sapnice su izrađene od iste glinene smjese kao i stijenke peći. U vrata su umetnute u suhom, djelomično ispečenome stanju. Prije umetanja u vrata sapnice su osušene na zraku, zagrijane uz rub otvorene vatre te potom djelomično ispečene polaganjem u vatrište. Izgradnja peći ukupno je trajala osam sati.

Direktni postupak taljenja

Priprema i vrsta sirovina

U eksperimentima je korištena močvarna željezna ruda prikupljena na prostoru okruga Somogy, Republika Mađarska (Thiele, Kercksmár 2014; Karavidović 2019:

⁶ Ulomci izlomljene stijenke peći pronađeni su koncentrirani zapadno od ložišta talioničke peći na lokalitetu Virje – Volarski breg. Nalaz je interpretiran kao dio urušene stijenke peći. Na osnovi ovoga nalaza pretpostavljen je visina nadzemne strukture oko 60–70 cm.



Sl. 1 Faze izgradnje i dimenzije rekonstrukcije talioničke peći (izradila: T. Karavidović)

Fig. 1 Building phases and dimensions of reconstructed smelting furnace (made by: T. Karavidović)

3–4).⁷ Taljena je ruda u sirovome i prženome stanju, po dimenzijama jednako granulirana, i to u dva zasebna postupka (tab. 1). Priprema rude za taljenje uključivala je: ispiranje, prženje i usitnjavanje (prvo taljenje), te ispiranje, sušenje i usitnjavanje (drugo taljenje). Ruda je, neposredno po vađenju iz ležišta, isprana u obližnjem potoku te ručno očišćena od ostataka gline i pijeska u sloju. Sirova ruda je sušena u hladu mjesec dana, dok je postupak prženja (Karavidović 2020: 130–136, eksperiment 2) izveden nad rudom u nepotpuno suhome stanju. Ruda je pržena šest sati na temperaturama čiji je maksimalni raspon kroz cijelo vrijeme trajanja postupka bio na svim mjerenim položajima između 299 i 1038 °C, u prosjeku između 500 i 650 °C. Rezultat eksperimenta bio je dobro pržena ruda, što je na makroskopskoj razini bilo vidljivo kroz promjenu u boji, ali i razini poroznosti rude. Ruda je ujedno izgubila na težini 42% početne težine, što se

pripisuje gubitku vlage i sagorijevanju organskih primjesa (Buchwald 1998: 22–23; Rzepa et al. 2016: 618–619). Prženi ulomci rude bili su dimenzija 5–15 cm u promjeru te je tek nakon prženja ona usitnjena. Pri usitnjavanju rude primijećena je veća razina rahlosti i poroznosti kod pržene naspram nepržene rude zbog čega je postupak usitnjavanja bio lakši. Utrošak drva prema dobivenim rezultatima eksperimenta na 1 kg nepržene, vlažne rude, bio je 0.007 m³ suhoga drva jele. Utrošak drva, ali i vremena prženja može varirati ovisno o načinu prženja (tip konstrukcije), svojstvima iskorištenoga drva (suho drvo različite kalorijske vrijednosti ili pougljeno drvo), količini i svojstvima rude (suha ili vlažna, dimenzije ulomaka) te razini prženja.

Nakon izgradnje, peć je sušena paljenjem vatre u ložištu koristeći se pri tome različitim vrstama suhoga drva (grane) lokalnoga podrijetla i cjepanica jelina drva. Pri taljenju je korišten drveni ugljen lokalne proizvodnje (ugljenice iz okolice Križevaca), mješavina drva bukve i graba. Ugljen je pripremljen na način da su ulomci usitnjeni na dimenzije slične dimenzijama ulomaka rude (tab. 1).

7 Ruda je prikupljena tijekom održavanja radionice The 11th Iron Smelting Workshop u srpnju 2019. godine (voditelj: dr. sc. Adam Thiele, Somogyfajsz, Republika Mađarska). Ovom prilikom zahvaljujem na omogućavanju provedbe eksperimenta.

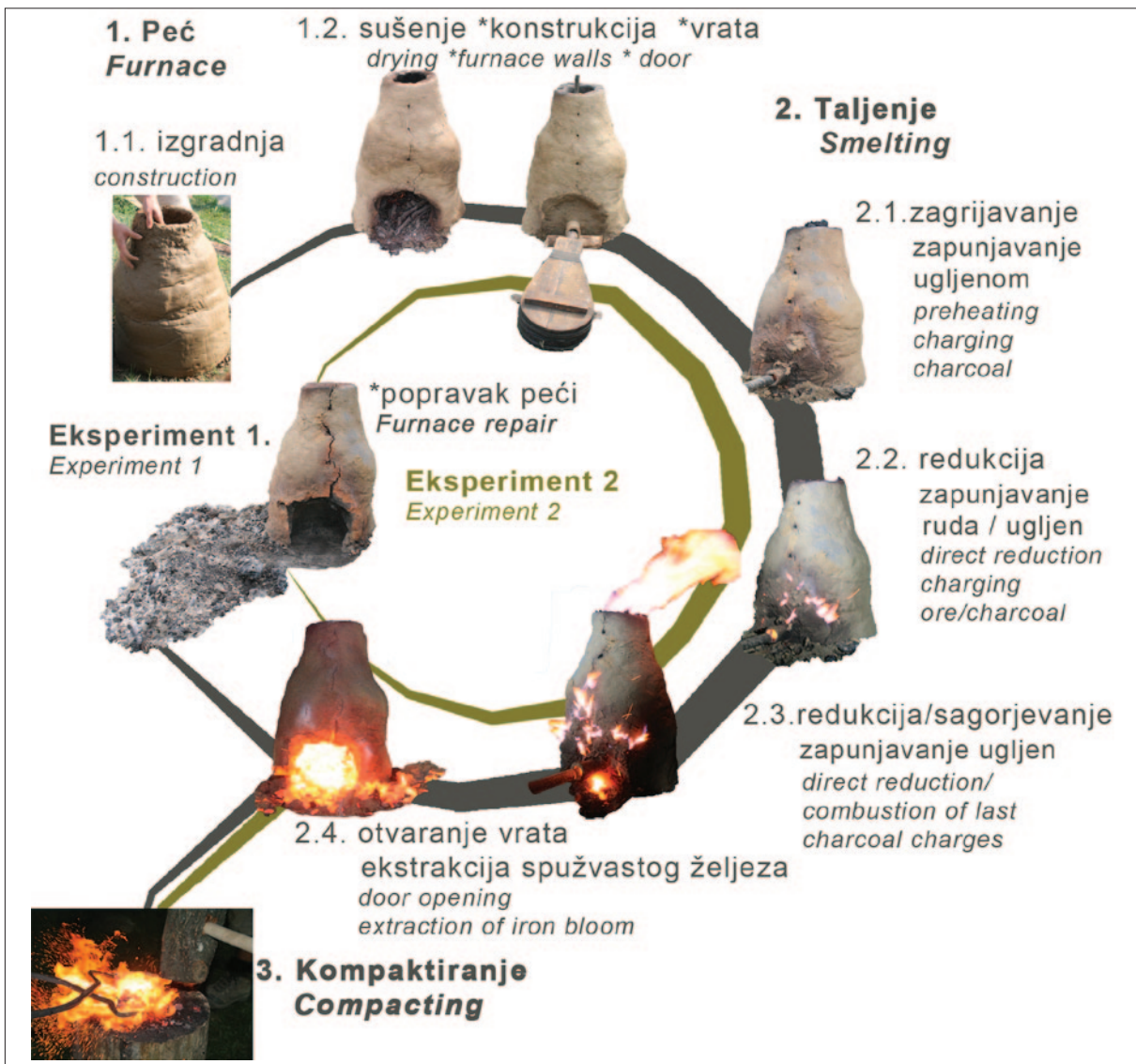


Tijek postupaka taljenja

Prvi postupak proveden je neposredno po izgradnji te sušenju stijenci peći i vrata, dok je drugi obavljen idući dan. Oba postupka izvedena su istim tijekom koji podrazumijeva nekoliko koraka (sl. 2; tab. 3): 1) sušenje stijenci peći (1. postupak); 2) umetanje i sušenje vrata (1. i 2. postupak); 3) zapunjavanje peći ugljenom (zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere); 4) zapunjavanje peći mješavinom ugljena i rude; 5) zapunjavanje ugljenom; 6) otvaranje vrata i ekstrakcija spužvastog željeza; 7) kompaktiranje spužvastog željeza. Sušenje peći odvijalo se u dva stadija: a) sušenje nadzemnoga dijela s otvorenim prostorom za umetanje vrata (prije prvog taljenja); b) umetanje i sušenje vrata peći sa sapnicom (pri svakome taljenju).

Prije početka zagrijavanja (umetanja ugljena), svo suho drvo korišteno za sušenje je u potpunosti sagoreno. Peći su potom postupno zapunjene ugljenom (cijeli volumen peći, 20 kg ugljena) kako bi se temperatura unutar peći podigla i stvorili reduktivni uvjeti. Nakon što je zapunjen cijeli volumen peći samo ugljenom, započelo se s naizmjeničnim ubacivanjem rude i ugljena u omjeru težine 1 : 1 (0,5 kg : 0,5 kg) kod oba taljenja. U ovoj fazi kod oba postupka ubačeno je ukupno 12 kg rude i 12 kg ugljena.

Količina ubačene rude i ugljena nije mjerena pri svakome ubacivanju, već je izmjerena ukupna količina prije taljenja i pojedinačna količina za obje sirovine te se svakim slijedećim punjenjem određivala na temelju volumena u lopatici kojom se grabila ruda i ugljen. Ritam ubacivanja rude slijedio je ritam sagorijevanja ugljena i spuštanja zapune niz okno peći. Na taj način mjerica je ubačena svakih 4–9 minuta (1. taljenje), odnosno 4–7 minuta (2. taljenje). Za stvaranje induciranoga propuha i sagorijevanje ugljena korišten je mijeh zapune 85 litara koji se u potpunosti zapunjavao zrakom prije svakoga upuha kroz sapnicu. Pojedini upuh trajao je 4 sekunde i jedna sekunda zapunjavanja volumena mijeha zrakom (kontinuirani jednoličan protok zraka, između 17 i 21,25 litara zraka/sekunda). Nakon što se ubacila ukupna količina rude i ugljena, peć je dodatno zapunjena samo ugljenom kako bi se osigurala reduktivna atmosfera za zadnja punjenja rude. Količina ugljena ubačena nakon zadnje mjerice rude predodređena je prema pretpostavljenome volumenu dijela peći od vrha do visine na kojoj se formira spužvasto željezo. Kod drugoga taljenja ubačeno je nešto više od 1/3 ukupne zapremnine peći (8 kg ugljena), a kod prvoga eksperimenta gotovo duplo manja količina (3,6 kg ugljena). Ukupna količina ugljena (tab. 1) iskorištena za taljenje može se



Sl. 2 Grafički prikaz ciklusa izvedenih postupaka (izradila: T. Karavidović)

Fig. 2 Graphic representation of the cycle of performed processes (made by: T. Karavidović)

POSTUPAK/PROCEDURE	TRAJANJE/DURATION h.min	
	Peć /Furnace 1.1	Peć /Furnace 1.2
Gradnja / popravak peći <i>Furnace construction/repair</i>	8,00	0,30
Sušenje - konstrukcija peći <i>Drying - furnace construction</i>	3,45	0,00
Sušenje - vrata <i>Drying - furnace door</i>	0,45	2,30
Taljenje (zagrijavanje, redukcija) <i>Smelting - preheating and direct reduction</i>	5,50	6,36
Kompaktiranje spužvastog željeza <i>Compacting of the iron bloom</i>	0,10	0,10
Ukupno trajanje - svi postupci <i>Total duration - all procedures</i>	18,30	9,46
Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompaktiranje <i>Total duration - drying, preheating, direct reduction, compacting</i>	10,30	9,16

Tab. 2 Zabilježeno vrijeme trajanja svih postupaka (izradila: T. Karavidović)

Tab. 2 Recorded duration of all procedures (made by: T. Karavidović)

promatrati kroz tri faze talioničkoga postupka (tab. 3): početnoga zagrijavanja peći (1. faza) te dvije faze redukcije (2. i 3. faza). Količina ugljena potrebna za zagrijavanje ovisna je o zapremnini peći, dok je za vrijeme obje faze redukcije ona proizvoljno određena s obzirom na zadani omjer rude i ugljena (2. faza) te procijenjenu zapremninu donjega dijela peći (3. faza) te ne ovisi o razini i načinu pripreme rude. Nakon što je preostali ugljen izgorio do razine neposredno iznad očekivanoga položaja spužvastoga željeza, vrata peći su otvorena te je kovačkim kliještima izvađeno spužvasto željezo. Potom je užareno spužvasto željezo kompaktirano naizmjeničnim udarcima drvenim čekićima. U postupku kompaktiranja sudjelovalo je troje ljudi, jedna osoba pridržava i okreće spužvasto željezo, dok dvije osobe naizmjenično udaraju. Postupak je svaki puta trajao nekoliko minuta (cca 5 min), do trenutka kada se spužvasto željezo toliko ohladilo da kompaktiranje više nije bilo moguće.

Neposredno nakon vađenja spužvastoga željeza, dno peći je ostrugano, odnosno izbačena je sva zaostala zgura kako bi se peć mogla iznova koristiti. Hlađenje zgure unutar peći otežalo bi njezino odstranjivanje, a potencijalno bi se i zalijepila za stijenke peći. Ovaj postupak izveden je kod prvoga taljenja, dok kod drugoga taljenja zgura nije očišćena već se ohladila u unutrašnjosti peći.

REZULTATI I ANALIZA EKSPERIMENTA

Tijekom taljenja pržene rude primijećeno je kako u gornjem dijelu peći, prije spuštanja niz okno, ruda poprimi jednoličnu crvenu boju, dok je nepržena ruda poprimila crvenkastu boju, no tek mjestimično, iako su izmjerene temperature bile vrlo slične. Izmjerena temperatura koja djeluje na rudu u gornjim dijelovima zapune

bila je između 267 i 511 °C kod prvoga te 308 i 536 °C kod drugoga taljenja. Iz potonjega je moguće zaključiti da se nepržena ruda u taljenju nije ravnomjerno ispržila, odnosno prva razina procesa redukcije se ne odvija jednolično u oba postupka. Duže vrijeme zadržavanja na ovoj temperaturi, prije spuštanja niz okno, odnosno sporiji ritam sagorijevanja i/ili veća visina peći imali bi značajni utjecaj. Međutim, u oba taljenja proizvedeno je spužvasto željezo, odnosno možemo reći da su oba taljenja izvedena uspješno te da je, bez obzira na razliku u razini pripreme rude, u ovakvome modelu peći i uz izvedeni tijek i uspostavljene uvjete moguće istaliti obje varijante ove rude. U tijeku postupka nije primijećena bitna razlika u količini ili brzini stvaranja zgure te se otprilike u istome dijelu postupka stvorila potreba za ispuštanjem tekuće zgure.⁸ Tekuća zgura u oba taljenja prvi puta je ispuštena za vrijeme treće faze taljenja, sagorijevanja ugljena (3 sata nakon što je ubačena prva mjerica rude). Potom je u vremenskome razmaku od oko pola sata zgura ispuštena još dva puta. Temperatura zgure tijekom istjecanja je bila 1300 °C i 1350 °C kod prvoga taljenja (nakon 1 minute hlađenja temperatura se spustila na 1071 °C). Postupkom taljenja proizvedeno je spužvasto željezo (sl. 3), konglomerat zgure i željeza, koje je nakon postupka kompaktiranja težilo 1800 g (1. taljenje) i 2150 g (2. taljenje, dva ulomka od 1750 i 400 g). U trenutku vađenja užarenoga spužvastog željeza iz peći temperatura površine iznosila je 1147 °C (1. taljenje) i 1125 °C (2. taljenje), dok je u trenutku prestanka kompaktiranja iznosila 924 °C i 988–951 °C.⁹

8 Na ispuštanje tekuće zgure odlučilo se nakon što je primijećeno učestalo nakupljanje sloja zgure na unutarnjem otvoru sapnice.

9 Temperatura površine spužvastoga željeza pri kojoj je primijećeno da se ohladilo tako da nije moguće izbiti zguru bila je 988 °C. Grumen spužvastoga željeza pokušalo se presjeci kako bi se provjerila kvaliteta, međutim, u tome trenutku ono se već toliko ohladilo da to nije bilo moguće (temp. 951 °C).



EKSPERIMENT	1. FAZA ZAGRIVANJE I STVARANJE REDUKTIVNE ATMOSFERE Phase 1 Preheating - reducing atmosphere				2. FAZA REDUKCIJA Phase 2 Direct reduction				3. FAZA REDUKCIJA I SAGORJEVANJE Phase 3 Direct reduction and charcoal burning				UKUPNO UTROŠAK Total consumption					
	TRAJANJE Duration h.min		VRSTA SIROVINE Type of raw material (kg)		TRAJANJE Duration h.min		VRSTA SIROVINE Type of raw material (kg)		TRAJANJE Duration h.min		VRSTA SIROVINE Type of raw material (kg)		SIROVINE Raw material (kg)		OSOBE People			
	UGLJEN Charcoal		RUDA Ore		UGLJEN Charcoal		RUDA Ore		UGLJEN Charcoal		RUDA Ore		UGLJEN Charcoal		RUDA Ore		BROJ Sum	
	h.min		kg		h.min		kg		h.min		kg		kg		kg		People	
1	2,15	20,0	0,0	2,35	12,0	12,0	12,0	1,00	3,6	0,0	0,0	5,45	35,6	12,0	2-3	2-3		
2	2,00	20,0	0,0	2,11	12,0	12,0	12,0	2,25	8,0	0,0	0,0	6,36	40,0	12,0	2-3	2-3		

Tab. 3 Podaci o trajanju i utrošku sirovina te ljudskih resursa pri postupku taljenja u oba eksperimenta (izradila: T. Karavidović)

Tab. 3 Data on the duration and consumption of raw materials and human resources during the smelting process in both experiments (made by: T. Karavidović)

Iz kvantitativne analize (tab. 4) vidljivo je da su omjeri između rude, zgure i spužvastoga željeza slični kod oba eksperimenta, no ipak je postupkom taljenja nepržene rude dobivena veća količina spužvastoga željeza i manja količina izdvojene zgure. Pri kompaktiranju je primijećeno kako je spužvasto željezo nastalo u postupku taljenja nepržene rude podložno lomljenju i slabije povezano (fragmentiranost) zbog čega ga je bilo moguće manje obraditi i izbaciti zguru prije no što se ohladilo. Potonje može biti razlog njegove veće težine ujedno i manje količine izbačene zgure (tab. 4), ali može ukazivati i na manju kvalitetu spužvastoga željeza dobivenoga taljenjem nepržene rude. Razlika u kompaktnosti spužvastoga željeza mogla je biti uzrokovana svojstvima nepržene rude, ali i ne potpuno optimalnom visinom peći i dužinom trajanja postupka (2. i 3. faza taljenja, tab. 3). S obzirom da je spužvasto željezo svojevrsan poluproizvod, konglomerat željeza i zarobljene zgure, realne omjere količine dobivenoga željeza moguće je procijeniti tek nakon pročišćavanja, postupka konsolidacije, odnosno primarnoga kovanja, slijedećega koraka u nizu postupaka koji vode proizvodnji željeza. Također, kroz primarno i sekundarno kovanje biti će moguće procijeniti na empiričkoj razini postoji li značajnija razlika u svojstvima dobivenoga željeza.

Razlike između postupaka moguće je vidjeti u vremenu trajanja druge faze taljenja,¹⁰ odnosno ritmu propadanja rude niz okno (tab. 3). Ovdje je primijećeno da je redukcija nepržene rude trajala 24 minute kraće, iako je ritam i količina upuhnutoga zraka te količina ubačenih sirovina bila ista. Povećanjem količine rude u pojedinome taljenju i/ili broja taljenja, utrošak vremena proporcionalno bi se značajnije smanjio te bi ova razlika bila osjetnija. Bitno je naglasiti da vremensko trajanje druge faze taljenja nije u potpunosti mjerodavna varijabla s obzirom da je mogla biti uzrokovana i sustavnim ubacivanjem nešto većih mjerica rude kod drugoga naspram prvoga eksperimenta s obzirom na, iako jednoličan, neprecizan sustav mjerenja.

Temperaturni režim zabilježen je na više položaja unutar peći i s vanjske strane stijenki peći tijekom postupaka taljenja. Iz dobivenih rezultata (sl. 4), u oba primjera mjerenja, razvidno je da se temperatura naglo podiže uslijed zapunjavanja punoga volumena peći ugljenom (zagrijavanje) te tijekom postupka taljenja održava prilično jednoličan režim na svim mjerenim položajima. Postignute temperature dobro su raspoređene prema vertikalno raspoređenim zonama unutar peći te dovoljne za efikasnu redukciju rude (Pleiner 2000: 133–137). Relativno visoke temperature u ložištu (<1250 °C) mogu se pripisati vrlo intenzivnom upuhivanju zraka kroz sapnicu (1020–1275 l/min), što utječe i na brzinu sagorijevanja ugljena, odnosno spuštanja rude niz okno.

Prema rezultatima mjerenja utroška vremena i ljudskih resursa (tab. 2–3), postupak izgradnje, sušenja i taljenja načelno bi bilo moguće izvesti u jednome danu, a svako slijedeće taljenje u istoj peći zahtijevalo bi manji utrošak vremena te je tijekom jednoga dana moguće izvesti i više taljenja. Konstrukcija ovoga tipa peći s vratima, odnosno otvorom kroz koji je moguće izvaditi spužvasto željezo ostavljajući ostalu stijenkicu nedirnutu, namijenjena je višestrukoj uporabi i u slučaju oštećenja, uz naknadne manje popravke napuknutih stijenki. Teoretski, pukotine na peći mogle bi negativno utjecati na postupak taljenja u

10 Ostale faze imaju slično trajanje. Ovdje je bitno naglasiti da je u zadnjoj fazi (umetanje ugljena) u drugome taljenju proizvoljno ubačeno više ugljena što je utjecalo na vrijeme trajanja ovoga dijela postupka. Potonje je moglo utjecati i na količinu i karakteristike dobivenoga spužvastog željeza (o produženom trajanju postupka vidi: Pleiner 2000: 137).

VRSTA / TYPE	POSTUPAK / PROCEDURE	MASA / MASS (gram)	
		peć / furnace 1.1.	peć / furnace 1.2.
ruda ore	ispiranje, prženje, usitnjavanje / washing, roasting, crushing (1.1) ispiranje, sušenje, usitnjavanje / washing, drying, crushing (1.2)	12000	12000
zgura slag	taljenje / smelting	6506	6557
	kompaktiranje / compacting	350	250
spužvasto željezo iron bloom	taljenje + kompaktiranje / smelting + compacting	1800	1750 + 400
RELATIVNI OMJER / RELATIVE RATIO ruda : zgura : spužvasto željezo ore : slag : iron bloom		1.7 : 1 : 0.2	1.7 : 1 : 0.3

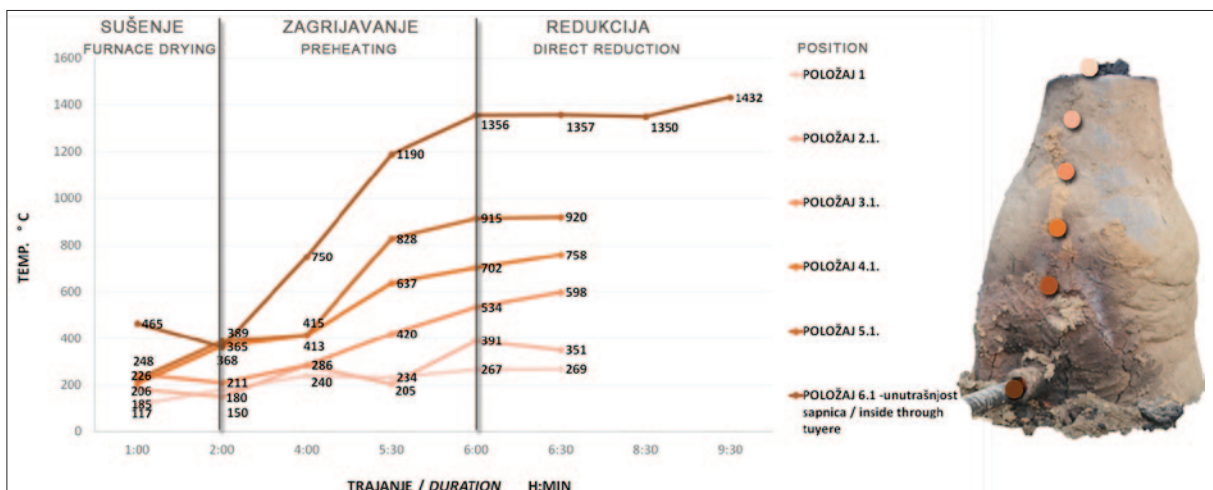
Tab. 4 Usporedba količine taljene rude, nastaloga otpada (zgure) i spužvastoga željeza u oba eksperimenta (izradila: T. Karavidović)

Tab. 4 Comparison of quantities of smelted ore, resulting waste (slag), and compacted iron bloom in both experiments (made by: T. Karavidović)



Sl. 3 Spužvasto željezo: 1 Eksperiment 1; 2 Eksperiment 2 (izradila: T. Karavidović)

Fig. 3 Iron bloom: 1 Experiment 1; 2 Experiment 2 (made by: T. Karavidović)



Sl. 4 Temperaturni režim unutrašnjosti peći tijekom postupaka sušenja konstrukcije peći te taljenja (zagrijavanja i redukcije) (izradila: T. Karavidović)

Fig. 4 Temperature regime inside the furnace during the processes of drying the furnace structure and smelting (preheating and reduction) (made by: T. Karavidović)



vidu ulaska zraka (oksidacija) i smanjivanja temperature unutar peći, no oštećenja na stijenka koja su se stvorila već tijekom sušenja peći (sl. 2) nisu se značajnije proširivala daljnjim korištenjem te nije prepoznat utjecaj na postupke taljenja. Međutim, vertikalne pukotine ipak su negativno utjecale na čvrstoću i stabilnost konstrukcije, odnosno povećala se mogućnost stvaranja većih oštećenja pri razbijanju vrata u svakome narednom taljenju. Iako je konstrukcija poslužila svrsi, veća razina iskustva, optimalniji sastav gline i ritam postupaka sušenja i zagrijavanja u prvome redu, zasigurno je mogao pridonijeti konstrukciji kod koje bi oštećenja bila manje prisutna i time rizik od urušavanja pri svakom idućem taljenju umanjen.

ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Eksperimentom prikazanim u ovome radu potvrđeno je kako je pod istim, zadanim uvjetima, prvenstveno modela talioničke peći te postupka taljenja (slijed i ritam izvođenja postupaka, količina zraka i ritam upuhivanja, omjer rude i ugljena u drugoj fazi taljenja te veličina ulomaka rude) moguće proizvesti podjednaku količinu spužvastoga željeza i zgure taljenjem pržene i nepržene rude, pri čemu utrošak ostalih resursa može biti jednak. Spužvasto željezo nastalo taljenjem nepržene rude težilo je nešto više, no ovakva situacija vjerojatno je odraz višega udjela zgure prisutne u spužvastom željezu nakon kompaktiranja i/ili produženoga trajanja postupka taljenja (3. faza taljenja). Na razliku u kvaliteti dobivenoga spužvastog željeza mogla bi ukazivati i veća razina lomljivosti koja je ustanovljena pri kompaktiranju. Dodatno, s obzirom da je prženjem vlažna ruda korištena u eksperimentu izgubila oko 42% mase zbog gubitka vlage te sagorijevanja organskih primjesa, za očekivati je da će taljenje iste količine (u ovome slučaju 12 kg) nepržene rude, iako osušene, ipak rezultirati manjim prinosom u željezu. Veća prisutnost zgure u spužvastome željezu načelno bi značila i veći gubitak na masi prilikom daljnega postupka pročišćavanja (primarnoga kovanja), a potencijalno i duže vrijeme trajanja te veći utrošak ostalih resursa potrebnih za izvođenje ovoga postupka. Također, ona bi mogla označavati i manju količinu dobivenoga pročišćenog željeza. Međutim, ovakve zaključke potrebno je utvrditi višestrukim eksperimentalnim testiranjem te daljnjom obradom spužvastoga željeza. Realnije omjere količine i značajnije razlike u svojstvima proizvedenoga željeza (ako postoje) bit će moguće procijeniti nakon postupka primarnoga i sekundarnoga kovanja, dok bi dodatne arheometrijske analize odabranih uzoraka mogle objasniti eventualne razlike u svojstvima (kvaliteti) dobivenoga željeza.

Iako različita razina pripreme korištene rude u ovome eksperimentu nije ukazala na jasno mjerljivu razliku u količini i kvaliteti krajnjeg (polu)proizvoda niti utrošku resursa kod postupka taljenja, bitno je naglasiti da su močvarne željezne rude izrazito varijabilnoga geokemijskog sastava te je na prostoru iste regije moguće pronaći rude različite kvalitete. Stoga ostaje otvoreno pitanje da li i u kojoj mjeri bi se utjecaj prženja očitovao kada bismo promatrali više uzoraka močvarnih ruda širega raspona kvalitete.

LIRETATURA / BIBLIOGRAPHY

- Brenko, T., Borojević Šošarić, S., Ružičić, S., Sekelj Ivančan, T. 2019, Evidence for the formation of bog iron ore in soils of the Podravina region, NE Croatia: Geochemical and mineralogical study, *Quaternary International*, Vol. 536, 13–29. (<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.11.033>)
- Brenko, T. 2020, Godišnji izvještaj (3. projektna godina) za potrebu projekta Transfer, Zagreb (neobjavljeni rukopis pohranjen u Institutu za arheologiju). (<http://transfer.iarh.hr/images/Godi%C5%A1nji%20izvje%C5%A1taj%203.%20projektno%20godine.pdf>)
- Espelund, A. 2013, *The evidence and the secrets of ancient bloomery iron-making in Norway*, Arketype Forlag, Trondheim.
- Cleere, H. 1972, The classification of early iron smelting furnaces, *Antiquaries Journal*, Vol. 52(1), 8–23.
- Cleere, H. F. 1981, *The Iron Industry of Roman Britain*, Unpublished PhD Thesis, University of London, London. (<https://www.wealdeniron.org.uk/wpcontent/uploads/2019/08/HCleereThesis.pdf>)
- Charlton, M., Crew, P., Rehren, T., Shennan, S. 2010, Explaining the evolution of ironmaking recipes – an example from northwest Wales, *Journal Anthropological Archaeology*, Vol. 29(3), 352–367. (<https://doi.org/10.1016/j.jaa.2010.05.001>)
- Gömöri, J. 2000a, *Az avar kori és Árpád-kori vaskohászat régészeti emlékei Pannoniában Magyarország iparrégészeti lelőhelykatasztere I. Vasművészeti / The archaeometallurgical sites in Pannonia from the Avar and early Árpád period*, Soproni Múzeum, Sopron.
- Gömöri, J. 2000b, *Az avar kori és X-XI. századi vaskohászat régészeti emlékei Somogy megyében / The archaeometallurgical sites of county Somogy in the Avar and early Árpád-period*, *Somogy Megyei Múzeumok Közleményei*, Vol. 14, 163–218.
- Joosten, C. 2004, *Technology of Early Historical Iron Production in the Netherlands*, Geoarchaeological and Bioarchaeological Studies 2, Institute for Geo- and Bioarchaeology, Faculty of Earth and Life Sciences of the Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Karavidović, T. 2019, Izvješće o sudjelovanju na radionici 11th Iron smelting workshop 2019: from the soil to the iron product (Somogyfajsz, Republika Mađarska), Zagreb (neobjavljeni rukopis pohranjen u Institutu za arheologiju). (http://transfer.iarh.hr/images/5.-10.7.2019._izvijesce_Somogy_29.07-converted.pdf)
- Karavidović, T. 2020, Rekonstrukcija postupaka prženja željezne rude: eksperimentalni pristup, in: *Aktuelna interdisciplinarna istraživanja tehnologije u arheologiji Jugoistočne Europe*, Zbornik radova prvog skupa sekcije za arheometriju, arheotehnologiju i eksperimentalnu arheologiju Srpskog arheološkog društva, Vitezović S., Antonović D., Šarić K. (eds.), Srpsko arheološko društvo, Beograd, 130–137.
- Kelterborn, P. 1987, Principles of Experimental Research in Archaeology, *Bulletin of Experimental Archaeology*, Vol. 8, 11–12.
- Pleiner, R. 2000, *Iron in archaeology: The European Bloomery Smelters*, Archeologický ústav AVČR, Praha.
- Rzepa, G., Bajda, T., Gawel, A., Debiec, K., Drewniak, K. 2016, Mineral transformations and textural evolution during roasting of bog iron ores, *Journal of Thermal Analysis Calorimetry*, Vol. 123(1), 615–630. (<https://doi.org/10.1007/s10973-015-4925-1>)
- Sekelj Ivančan, T. 2009, Arheološka istraživanja ranosrednjovjekovne radionice za preradu željezne rudače na lokalitetu Virje – Volarski breg, *Annales Instituti Archaeologici*, Vol. V, 65–70.
- Sekelj Ivančan, T. 2010, Talionička djelatnost u okolici Molva u ranom srednjem vijeku, in: *Molve – ljudi, selo i okoliš u dugom trajanju (1658–2008.)*, Zbornik radova sa znanstvenog skupa u povodu 350-te obljetnice osnivanja današnjeg sela Molve, Kolar M., Petrić H. (eds.), Bibliotheca Scientiae Molvensis 2, Društvo za povjesnicu i starine Molve, Molve, 34–35.
- Sekelj Ivančan, T. 2011, Rezultati istraživanja nalazišta Virje – Volarski breg u 2010. godini, *Annales Instituti Archaeologici*, Vol. VII, 50–53.
- Sekelj Ivančan, T. 2013, Nastavak arheoloških istraživanja na položajima Volarski breg i Sušine kraj Virja u 2012. godini, *Annales Instituti Archaeologici*, Vol. IX, 48–54.
- Sekelj Ivančan, T. 2014a, Četvrta sezona arheoloških istraživanja nalazišta Virje – Volarski breg / Sušine, *Annales Instituti Archaeologici*, Vol. X, 99–103.
- Sekelj Ivančan, T. 2014b, Pregled dosadašnjih arheoloških istraživanja na lokalitetu Virje – Volarski breg / Sušine, *Podravski zbornik*, Vol. 40, 158–166.

- Sekelj Ivančan, T., Mušič, B. 2014c, Geofizička i arheološka istraživanja na nalazištu Virje: talionička radionica iz vremena kasne antike i ranog srednjeg vijeka, *Starohrvatska prosvjeta*, III. s. Vol. 41, 177–184.
- Sekelj Ivančan, T. 2016, Predindustrijska obrada željeza: pokazatelji talioničke djelatnosti na primjeru arheoloških nalazišta u Podravini, *Podravina. Časopis za multidisciplinarna istraživanja*, Vol. 15(29), 118–125.
- Sekelj Ivančan, T., Marković, T. 2017, The primary processing of iron in the Drava river basin during the Late Antiquity and the Early Middle Ages – the source of raw materials, in: *Archaeotechnology studies: Raw material exploitation from prehistory to the Middle Ages*, Vitezović S., Antonović D. (eds.), Srpsko arheološko društvo, Beograd, 143–160.
- Sekelj Ivančan, T., Valent, I. 2017, Ostaci talioničke radionice na lokalitetu Hlebine – Velike Hlebine, *Annales Instituti Archaeologici*, Vol. XIII, 73–76.
- Sekelj Ivančan, T. 2018a, Eksperimentalno taljenje željezne rude i razgradnja korištene talioničke peći, *Annales Instituti Archaeologici*, Vol. XIV, 154–162.
- Sekelj Ivančan, T. 2018b, Nastavak istraživanja talioničke radionice i naselja na lokalitetu Hlebine – Velike Hlebine, *Annales Instituti Archaeologici*, Vol. XIV, 65–71.
- Sauder, L., Williams, S. 2002, A practical treatise on the smelting and smithing of bloomery iron, *Historical Metallurgy*, Vol. 36(2), 122–131.
- Thiele, Á. 2010, Smelting experiments in the early medieval fajsi-type bloomery and the metallurgy of iron bloom, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 54(2), 99–104.
- Thiele, Á., Kercksmár, Zs. 2014, A belső-somogyi gyevasérc telepek archeometallurgiai jelensége és genetikája / Genetic types and archaeometallurgical role of bog iron ore deposits in Inner Somogy, *Bányászati és Kohászati Lapok – Bányászat*, Vol. 147(1), 19–24.

Summary

The mineralogical analysis (XRD) of ore samples found during the archaeological excavations at late antiquity and early medieval sites where iron production activities took place indicated differences that can be associated with the method of preparing ore for smelting. The ore samples from the Virje – Volarski Breg site and the sample from the Virje – Sušine site were not subjected to thermal treatment or the roasting procedure, while the samples from the sites of Hlebine – Velike Hlebine, Hlebine – Dedanovice, and Virje – Sušine, were probably roasted before smelting. Ore preparation processes (mechanical cleaning, roasting, crushing) can positively affect the suitability of ore for smelting in the direct process of reduction. As a rule, bog iron ore are easy to smelt, so the roasting process is possibly not absolutely necessary from the technological aspect. The experiment presented in this paper was designed to test one variant of the conceptual reconstruction of smelting furnaces (Fig. 1) and different methods of ore preparation (Tab. 1) in order to compare the impact of this variable on the smelting process and the end product. Other conditions (the furnace, air blowing rhythm, bellows size, charcoal properties) were the same for both instances. Experimental testing included: the preparation of raw materials (charcoal, clay, ore), the construction and drying of the smelting furnace, the smelting processes, and the compaction of spongy iron.

The smelting furnace was reconstructed on the basis of the analysis of the archaeological remains of the furnaces at the sites of Virje – Volarski Breg, Virje – Sušine, and Hlebine – Velike Hlebine. The furnace was made of loam of local origin, which was mixed with sand in a 3 : 1 ratio in favor of loam. The furnace was built gradually, using individual, cylindrically shaped fragments made from a previously prepared clay mixture.

The reconstructed furnace (Fig. 1) belongs to a type of free-standing shaft furnace with thinner walls and tapped slag, which is characterized by a shallow concave hearth from which the accumulated slag is discharged out of the furnace during the process.

In a single experiment, 12 kg of bog iron ore collected in the Somogy district (Republic of Hungary) were smelted. Locally produced charcoal, a mixture of beech and hornbeam wood, was used for the smelting. Ore and charcoal were fed into the furnace in a ratio of 1 : 1 (0.5 kg : 0.5 kg). The air was continuously blown through a bellow at a relatively uniform rhythm of about 17–21.25 l/sec. Both smelting procedures were carried out in the same order, which involved several steps (Fig. 2, Tab. 2). During the smelting, it was noticed that the unroasted ore in the upper parts of the furnace fill was not evenly roasted (color change), meaning that the first level of the reduction process was probably not fully completed before descending down the shaft. A longer period at this temperature or a slower burning rhythm and/or a taller furnace would have a more significant effect. However, both experimental smelts produced iron bloom which, after compaction, weighed 1,800 g (1st smelting) and 2150 g (2nd smelting, two fragments of 1750 and 400 g). During the processes, no difference was identified in the amount or rate of formation of slag, and liquid slag was discharged in both smelting instances during the third phase of smelting, the combustion of last charcoal fillings. The quantitative ratios of ore, slag, and spongy iron were very similar in both smelting instances (Tab. 4); still, the method of smelting unroasted ore resulted in a larger quantity of iron bloom and a smaller quantity of slag. The iron bloom created by smelting unroasted ore was slightly heavier, but this situation probably reflects the higher proportion of slag in spongy iron after compaction and/or prolonged duration of the smelting process (3rd smelting phase). The difference in the quality of the obtained spongy iron could be indicated by the higher level of brittleness, which was identified during compaction. Moreover, since the wet ore used in the experiment lost about 42% of its mass in the roasting because of moisture loss and the combustion of organic matter, it is to be expected that smelting the same amount of unroasted ore (12 kg in this case), although dried, will yield less iron after all. In principle, a greater share of slag in spongy iron would mean a greater loss in weight during the further process of purifying (primary smithing) and potentially also a longer duration and a greater consumption of other resources required for carrying out this method. It could also indicate a smaller quantity of purified iron obtained. However, these conclusions have to be established through repeated experimental testing and further processing of the iron bloom. More realistic quantity ratios and more significant differences (if any) in the properties of produced iron can be estimated after the primary and secondary smithing process, while additional archaeometric analyses of selected samples could explain any differences in the properties (quality) of obtained iron. The differences between processes can be seen in the duration of the second phase of smelting and the rhythm of the descent of ore down the shaft (Tab. 3). During the smelting of unroasted ore, this phase was 24 minutes shorter, although the same conditions were maintained (the rhythm and quantity of air input, the quantity and ratio of used raw materials). By increasing the quantity of ore in each smelting and/or the number of smelting rounds, the time spent would be proportionally more significantly reduced and this difference would be more pronounced. The temperature regime (Fig. 4) of the process indicates that the temperature inside the furnace rises sharply when the full volume of the furnace is filled with charcoal and maintains a fairly uniform regime at all the measured positions during the smelting process. The temperatures reached inside the furnace are regularly vertically distributed across the zones and suffice for efficient ore reduction. The high temperatures reached directly in front of the tuyere were caused by the high intensity of blowing and air flow (1020 – 1275 l/min) and directly affected the duration of the smelting process. In principle, it should be possible to carry out the process of furnace construction and drying, as well as smelting in a single day, and each subsequent smelting instance in the same furnace would require a shorter time, with several smelting rounds possible within the the same day (Fig. 2, Tab. 2). The construction of this type of furnace with a door is intended for repeated use even in case of furnace construction damage, with subsequent minor repairs of cracked walls.