

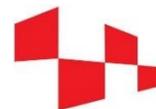
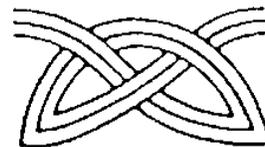


Eksperimentalni pristup proučavanju tehnologije proizvodnje željeza

Tena Karavidović

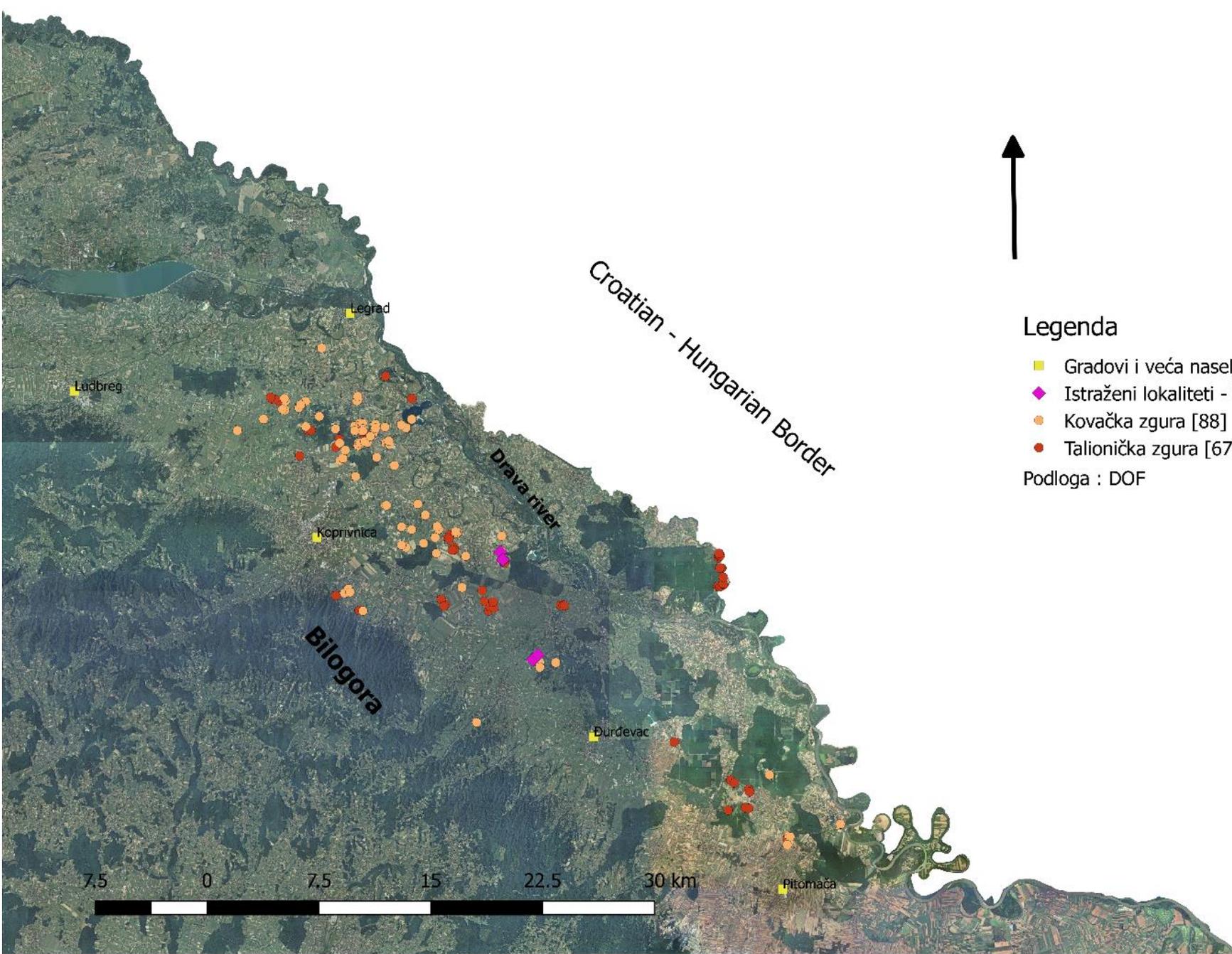
1. Okrugli stol: Rezultati arheoloških istraživanja na prostoru
Koprivničko-križevačke županije u 2019. godini

14. Studeni 2019. , Koprivnica



HRZZ
Hrvatska zaklada
za znanost

TransFER



Legenda

- Gradovi i veća naselja
- ◆ Istraženi lokaliteti - iskopavanja
- Kovačka zgura [88]
- Talionička zgura [67]

Podloga : DOF

Terenski pregled

- 70 položaja – talionička
- 88 položaja - kovačka

Arheološka iskopavanja:

- Virje – Volarski breg
- Virje - Sušine
- Hlebine – Velike Hlebine
- Hlebine – Dedanovice (?)

Tehnologija proizvodnje željeza : metode proučavanja

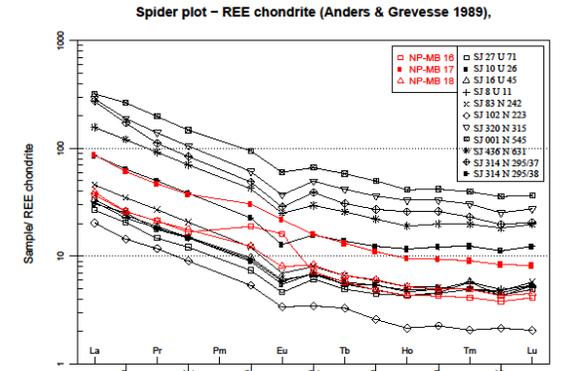
- Arheološko iskopavanje – arheološki zapis
- Arheometrijske analize
- Etnološka analogija
- Eksperimentalna arheologija

- Konstruktivni elementi talioničkih/kovačkih peći
- Prostorna organizacija radionice
- Analiza sirovina i talioničkog otpada - analiza tehnološkog procesa, identifikacija karakteristika sirovina i otpada, vrste i podrijetla sirovina (ruda, ugljen, glina)
- Razumijevanje metoda i alata korištenih pri procesu taljenja
- Prostorna organizacija
- Ljudski resursi

- Rekonstrukcija tehnološkog procesa – analiza omjera proizvod - stvoreni otpad,
- Usporedba otpada – arheološki zapis i eksperiment = razvoj metodologije obrade nalaza
- Usporedba tehnoloških rješenja – različit tip peći
- Procjena utroška sirovina i ostalih resursa



Makroskopska obrada arheoloških nalaza vezanih uz proizvodnju željeza



Analiza rezultata kemijske analize (ICP – MS) nalaza rude u arheološkom kontekstu



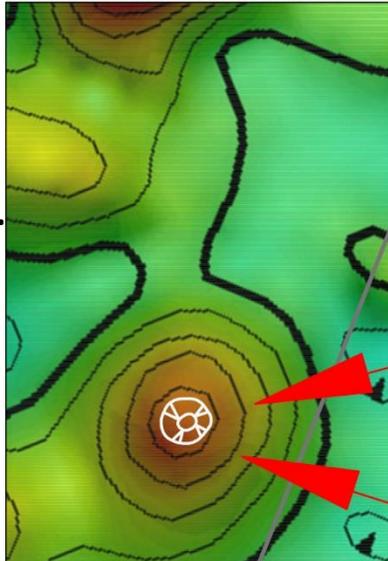
Eksperimentalno taljenje željezne rude, Koprivnica 2019



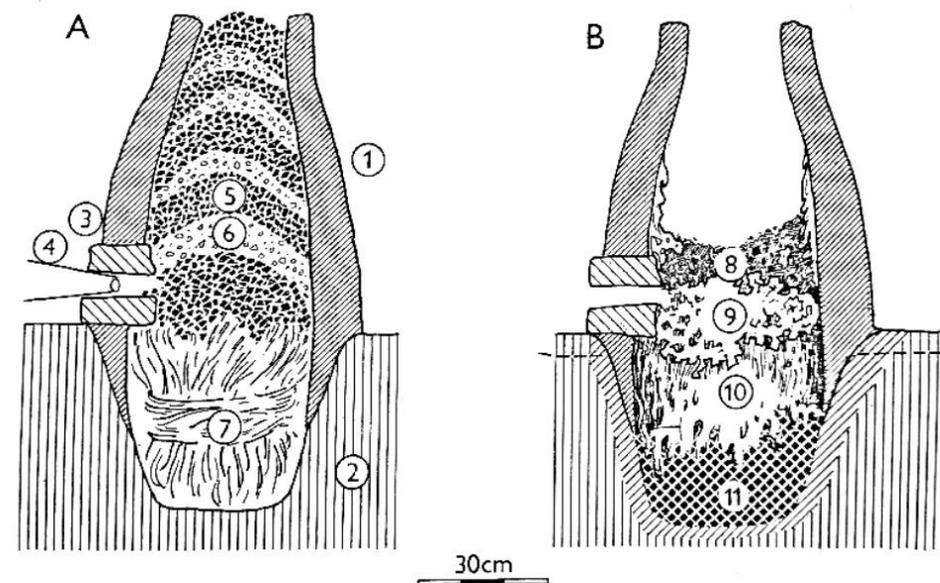
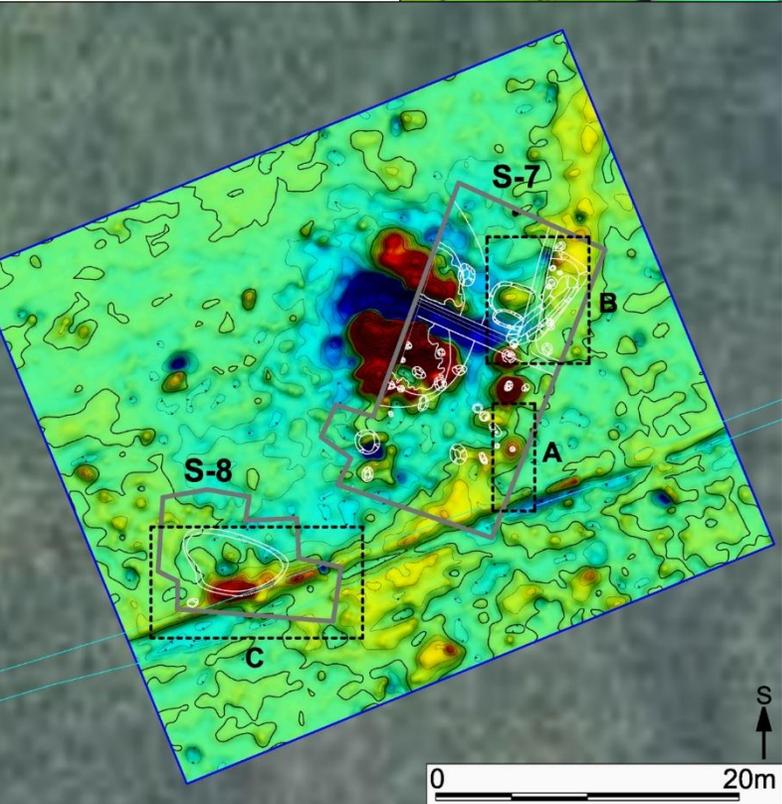
Taljenje željezne rude, Ruanda, Afrika

Virje – Sušine

- ostaci četiriju peći tzv. jamskog tipa – 8. st.
- Otpad – zgura karakteristična za peći na istek i sirova/pržena ruda – 5. st.



Stijenka peći sa sapnicom (dokumenta cija s istraživanja foto: T. S. Ivančan)

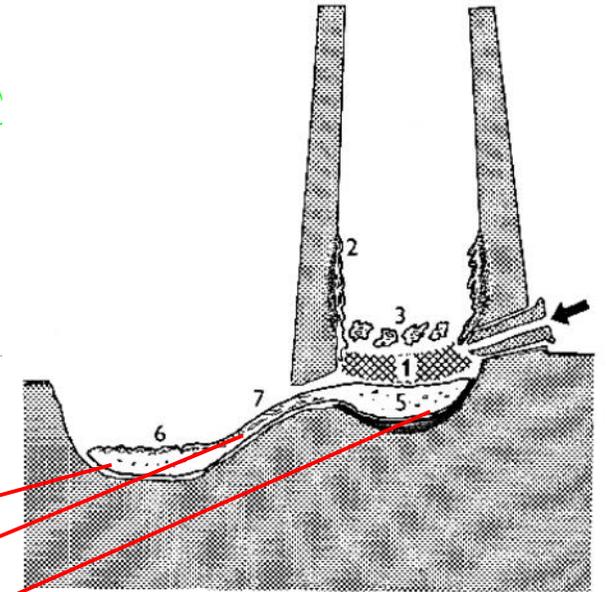
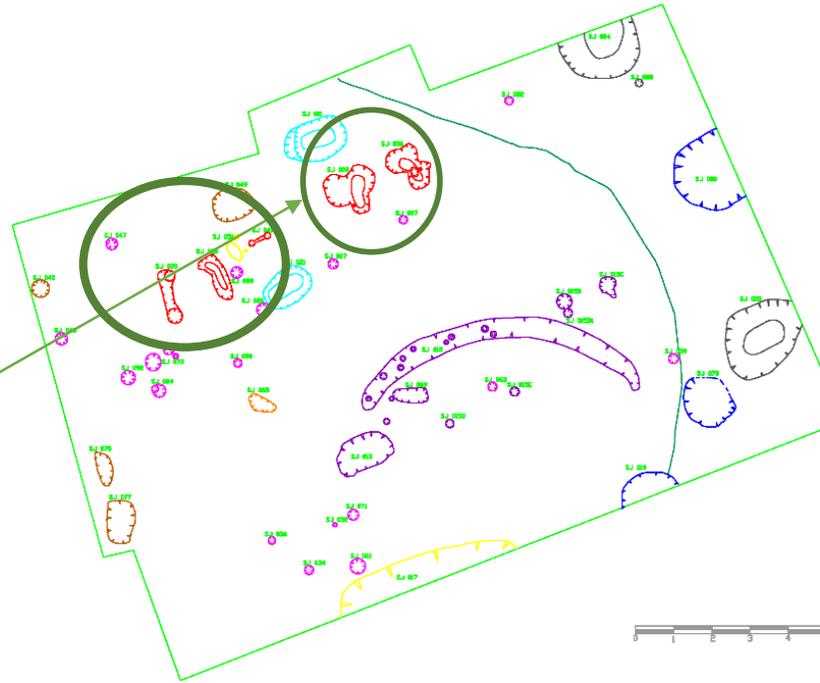
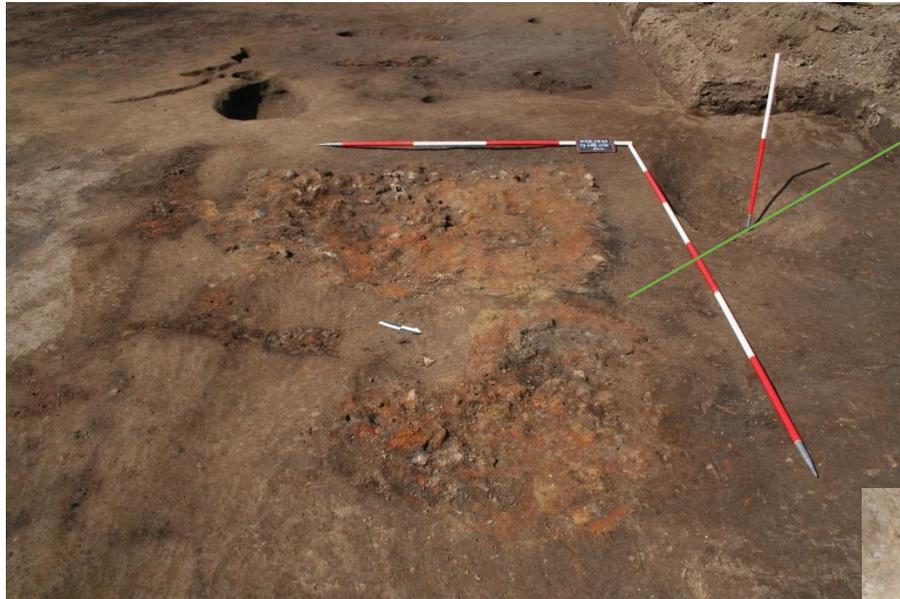


Jamske peći (eng. Slag pit furnace), A) zapuna peći pri početku procesa B) zapuna peći pri kraju procesa taljenja (Pleiner 2000: 150, fig. 35).

Virje – Volarski breg

- kraj 8. / početak 9. st.

ostaci 4/5 peći tipa plitko ukopane peći na istek



Peć na istek (Pleiner 2000: 258, fig. 67)

- *In situ* zgura:
- zdjelica/skledica (*furnace bottom slag*)
- unutrašnjost peći (*furnace slag*)
- curavka (*tap slag*)

Hlebine – Velike Hlebine

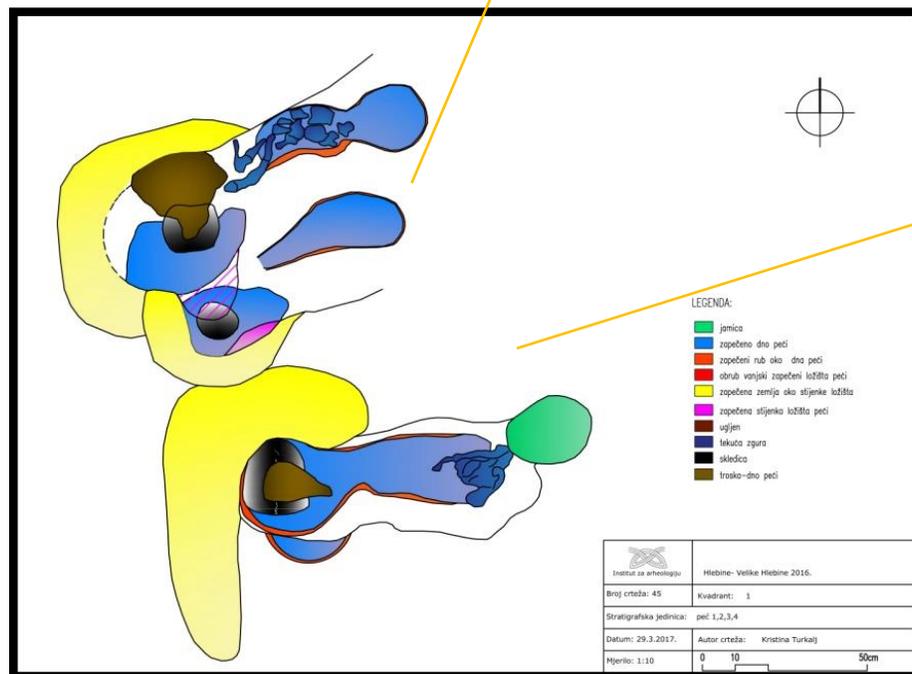
- poč – ½ 7. st.
- talioničke peći na istek



Talioničke peći SJ 037 i SJ 037/1 – ložišta sa zdjelastim dnom – IV faza čišćenja



Talionička peć SJ 038 s vidljivim ložištem (a), kanalićem (b) s talioničkom zgurom *in situ* i jamicom (c) – III faza čišćenja (Sekelj Ivančan 2016)

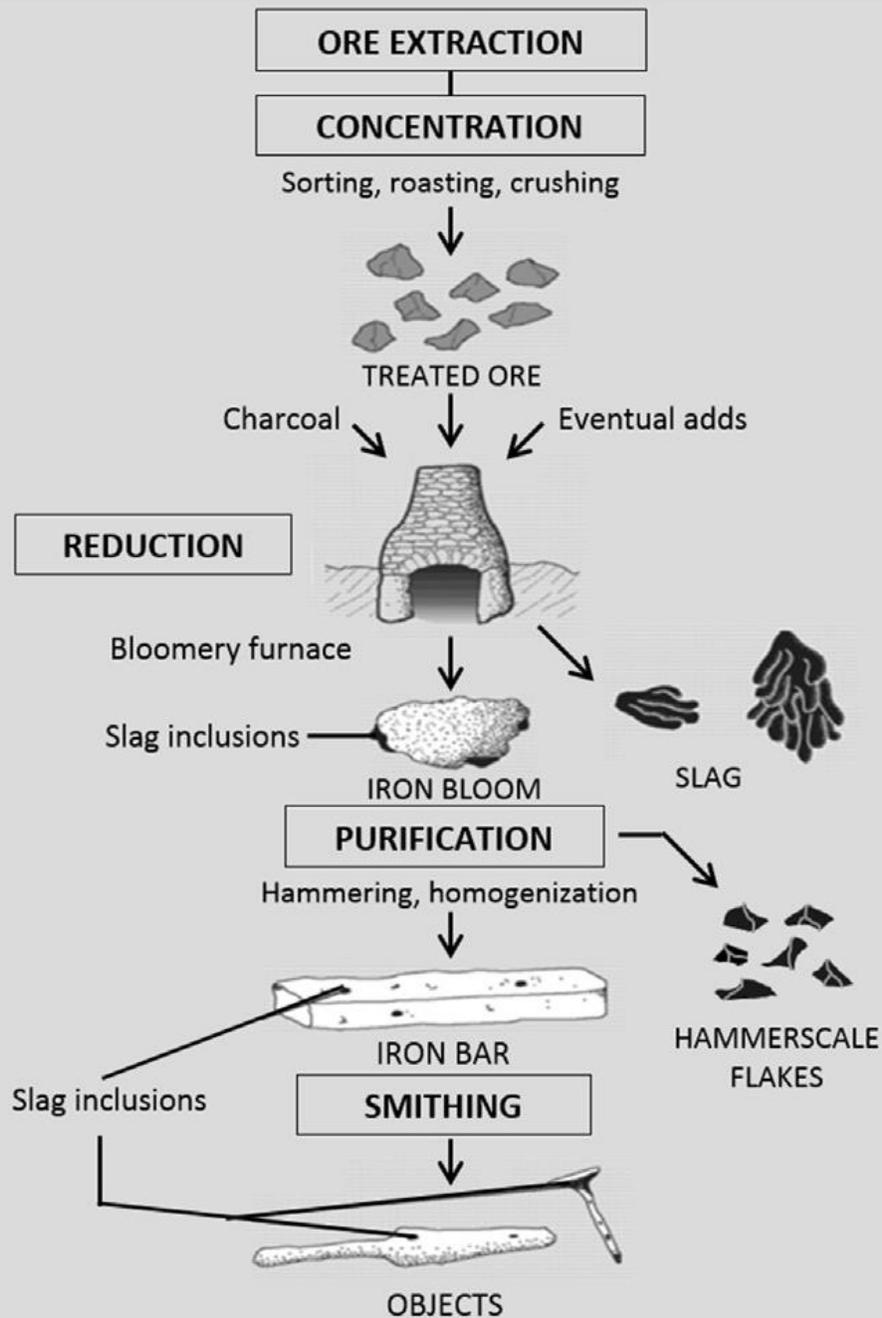


Tlocrt ukopa talioničkih peći (crtež : K. Turkalj)

Talionička peć SJ 038 sa zapečenim stijenama dna nakon uklanjanja zguze iz ložišta i kanalića - IV faza čišćenja (Sekelj Ivančan 2016)

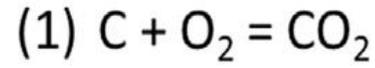


ulomak keramičke sarnice iz SJ 013 (Sekelj Ivančan 2016)



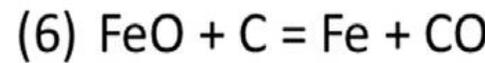
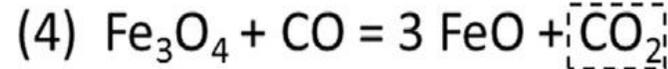
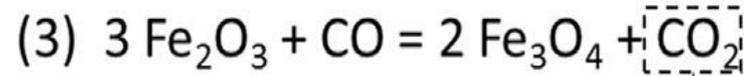
a

➤ FURNACE PREHEATING:

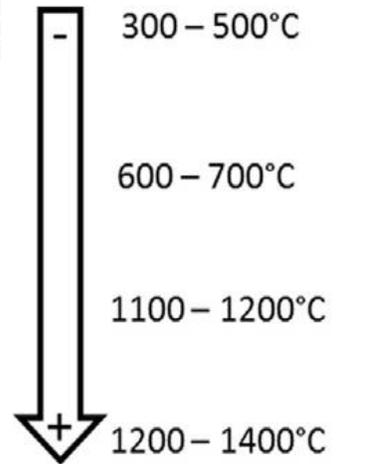


Optimal reducing conditions :
 $T \geq 1100^\circ\text{C}$; p_{O_2} of $\sim 10^{-10}$ bars
 (Fluzin et al., 2004)

➤ ORE REDUCTION:



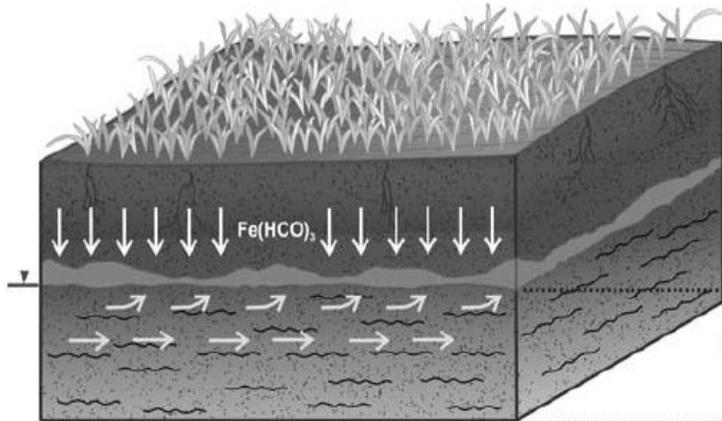
Consumed
by (2)



Estimated temperatures
(Mahé le Carlier, 1997)

b

Nabava sirovine –eksploatacija močvarne željezne rude



Shematski prikaz mehanizma taloženja močvarne željezne rude u odnosu na razinu podzemne vode (prema Werovska 2009)

Horizont taloženja
močvarne željezne rude

Podzemna voda
bogata Fe

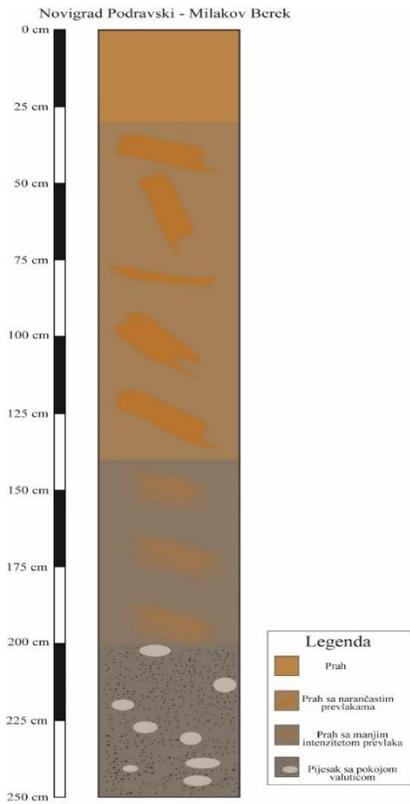
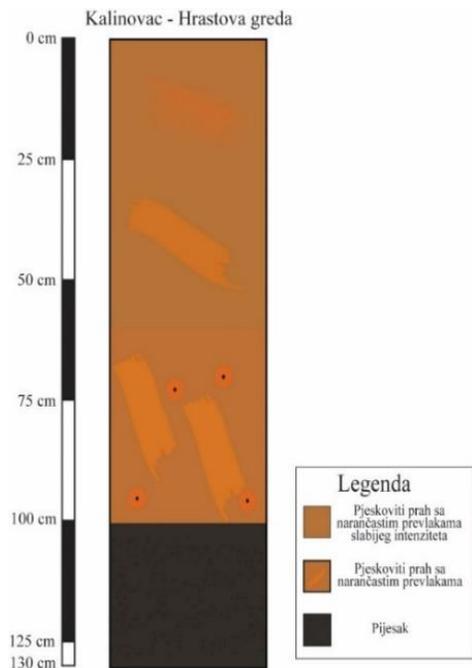
Humus

Ruda

Pjeskovita glina



Sloj močvarne željezne rude, Somogyfajsz, Republika Mađarska (radionica IRON SMELTING WORKSHOP 2019: FROM THE SOIL TO THE IRON PRODUCT)



Skicirani profili – geološka bušenja

Kalinovac - Hrastova greda,

Novigrad Podravski – Milakov berek (Brenko T. 2018)

Nabava sirovine – močvarna željezna ruda :prepoznavanje depozita



- Elementi prepoznavanja depozita u okolišu:
- karakteristike vegetacije (higrofilna), periodično plavljenje
- bakterije *Leptothrix*

Ležište močvarne željezne rude
Somogyfajsz, Republika Mađarska
(položaj 1.), srpanj 2019.



Mineraloške i geokemijske karakteristike rude – sirova i pržena ruda

Lab. broj.	Arh. Oznaka	Lokalitet	Vrsta nalaza	Kvarc	Goethit	Hematit	Magnetit	Wuestite	Fayalit	Rutile	Hedenbergite	Amorfna tvar
6648	SJ 107 (N 113)	Virje - Volarski Breg	Ruda - sirova	+++	+++	-	-	-	-	+	-	-
6649	SJ 111 (N 122)	Virje - Volarski Breg	Ruda - sirova	+++	+++	-	-	-	-	?	-	-
6650	SJ 111 (N130)	Virje - Volarski Breg	Ruda - sirova	+++	+++	-	-	-	-	+	-	-
7135	SJ 314 (N 295/51)	Virje - Sušine	Ruda - sirova	+	+++	-	-	-	-	-	-	-
6629	SJ 83 (N 242)	Hlebine - Velike Hlebine	Ruda -djelomično pržena	++	+++	-	+++	-	-	-	-	-
6852	SJ 27 (U 71)	Hlebine - Dedanovice	Ruda pržena	+	-	+++	-	-	-	-	-	-
6853	SJ 10 (U 26)	Hlebine - Dedanovice	Ruda pržena	+	-	+++	-	-	-	-	-	-
6854	SJ 16 (U 45)	Hlebine - Dedanovice	Ruda pržena	+	-	+++	-	-	-	-	-	-
6855	SJ 8 (U 11)	Hlebine - Dedanovice	Ruda pržena	+	-	+++	+	-	-	-	-	-
6638B	SJ 102/90 (N 223)	Hlebine - Velike Hlebine	Ruda pržena ?	+	++	-	+++	-	-	-	-	-



Virje - Volarski breg , sirova ruda, SJ 107, N-113



Hlebine – Dedanovice, uzorci pržene rude, SJ 8, U – 11/1b, SJ 16, U - 45

XRD analiza uzoraka rude iz arheološkog konteksta , Rudarsko–geološko-naftni fakultet Zagreb

- Tehnološka iskoristivost uzoraka rude
- Definiranje segmenata lanca operacija proizvodnje željeza na prostoru Podravine
- razlike u postupcima pripreme sirovine ?! 7 – 8/9.st = definiranje mogućnosti iskorištavanja sirove rude = interpretacija nalaza

Postupci pripreme sirovine – pirometalurška priprema

Radus donjeg dijela konstrukcije je bio oko 60 cm, gornjeg dijela krnjeg stošca oko 30 cm a visina 40 cm. Eksperimentalno prženje močvarne željezne rude na otvorenoj vatri, Somogyfajsz, srpanj 2019.



a)



b)



c)

- a) početak prženja,
- b) nakon 1:00 h prženja
- c) nakon 2:00 h prženja

Položaj mjerenja	Trajanje/h			Prosječna temperatura °C /položaj
	1.00	2.00	3.00	
POLOŽAJ 1	203	417	137	252.3
POLOŽAJ 2	244	224	134	200.7
POLOŽAJ 3	124	313	212	216.3
POLOŽAJ 4.1	805	876	752	811.0
POLOŽAJ 4.2	845	891	701	812.3
Prosječna temperatura °C/vrijeme	444.2	544.2	387.2	

Getit → $2\text{FeO}\cdot\text{OH} + \text{toplina} \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Hematit 300 – 500 °C

→ Magnetit – djelomična redukcija hematita !?

500 - 700°C

Definiranje učinaka:

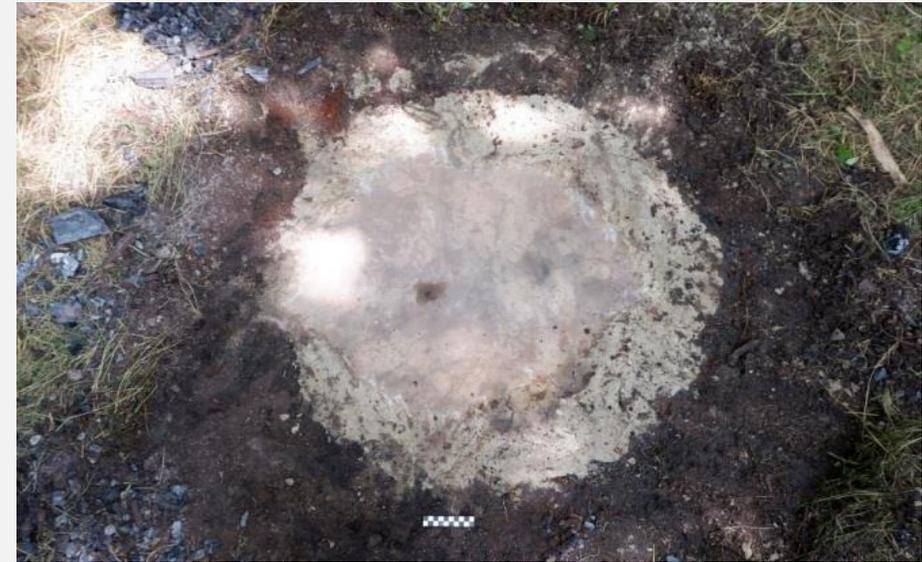
- temperature prženja
- promjene u kemijskom sastavu- usporedba s arheometrijskim podacima nalaza rude
- Promjene u boji, konzistenciji, volumenu – procjena utroška - gubitka, kvalitete
- 40 – 60 % gubitka u težini/masi, koncentracija
- Jednostavnije usitnjavanje
 - Vremensko trajanje, utrošak resursa(drvo)
- Pougljeno drvo – 0.054m^3 - 40 kg sirove rude
 - Utjecaj na postupak taljenja i prinos u željezu : razlike sirova i pržena ruda

- Usporedba s arheološkim zapisom = interpretacija arheoloških struktura



a) čišćenje površine, zamazivanje gline – izolacija topline – smanjenje utjecaja vlage iz tla

b) i c) zgradnja drvene konstrukcije vatrišta



Ostaci zapečenog sloja gline nakon prženja rude



Plitka jama sa zapečenim dnom, Hlebine – Velike Hlebine, Podravina , 7. st.

Postupak usitnjavanja rude?

Ulomci ruda različitih dimenzija u arheološkom kontekstu

- Vremensko trajanje, zahtjevnost
- Gubitci = procjena eksploatacije
- Utjecaj različite granulacije rude na postupak taljenja i finalni proizvod – različite rude (limonit i močvarna željezna ruda)

USITNJAVANJE



povećana reduksijska površina



POSPJEŠUJE PROCES REDUKCIJE



Lok. Hlebine – Dedanovice, uzorci usitnjene (?) pržene rude- cca 2x2 cm



Usitnjavanje rude
(limonit, Olumučany)
Adamov 2019.



**Sirovina : Močvarna željezna ruda, Somogy okrug,
Mađarska**

Koprivnica 2019:

Granulacija ruda :

1. ≤ 1 cm i rudni prah

2. 2 – 3 x 2 -3 cm

3. 3x4 – 5 cm

Somogy 2019:

Granulacija ruda : 1. rudni prah – peletiranje

2. 3x4 – 5 cm

Sirovina: limonit (Olomučany)

Adamov 2019: 1x2 - 3 cm

Granulacija ugljen: 2 – 4 x 2 – 4 cm





Gubitak nakon pirometalurške pripreme i usitnjavanja: iskorišteno 38% ukupne količine mase od sirove rude

Optimalna granulacija :

2. 2 – 3 x 2 -3 cm
3. 3x4 – 5 cm

Promjene u tehnološkom postupku : Virje Sušine i Virje Volarski breg / Velike Hlebine



Poluukopana peć -Somogy,
2019



Slobodno stojeća peć -
Koprivnica, 2018

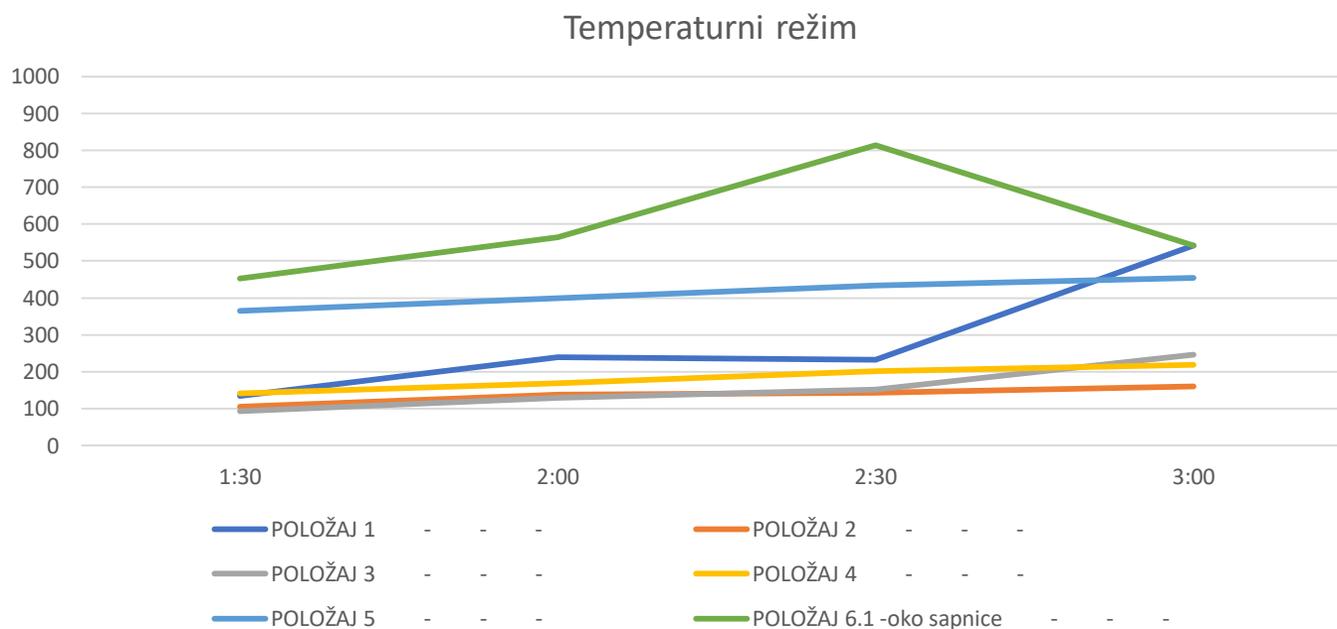
Testiranje različitih tipova peći i
usporedba funkcionalnih karakteristika



Jamska peć, Koprivnica 2019.

PEĆ 1 - HEMATIT (BRAZIL, DUNAJVAROS)	
Postupak	Trajanje/h.min
Gradnja peći	4
Sušenje - konstrukcija peći	2
Sušenje - vrata	0.30
Zagrijavanje i stvaranje reduktivne atmosfere/UGLJEN	0.30
Taljenje /RUDA + UGLJEN	2.38
Taljenje	3.08
Otvaranje i kompaktiranje spužvastog željeza	0.1
Ukupno trajanje	11.56
Ukupno trajanje - sušenje, zagrijavanje, taljenje i kompaktiranje	3.48

- Vrsta konstruktivnih materijala – glina i pijesak
- Utrošak – materijala - energije i vremena
- Konstrukcijski elementi i njihov utjecaj na uspješnost postupka (visina sapnice, otvora, visina peći, dubina ukopanog dijela)
- Postupci pri taljenju – omjer ruda – ugljen
- Ritam ubacivanja rude, upuhivanja zraka
- Temperaturni režim – usporedba s rezultatima arheometrijske analize zgure



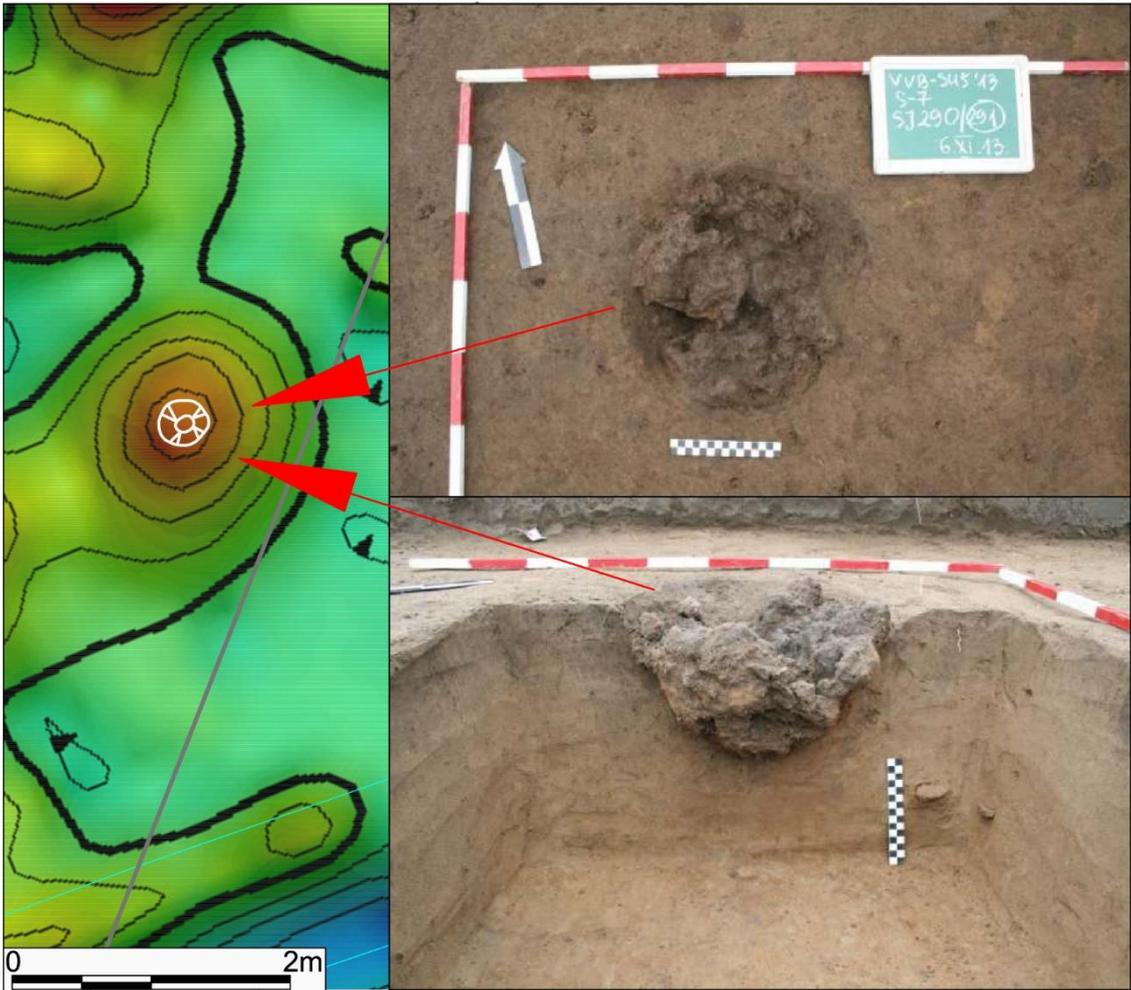
Reparacija i višestruko taljenje



- Praćenje razlika u režimu taljenja (vrijeme zagrijavanja peći, temperaturne izmjene)
- Definiranje funkcionalnosti višestrukog iskorištavanja peći – principi uporabe talioničkih peći
- Stvaranje arheološkog zapisa - usporedba

Temperaturne vrijednosti slične, početno zagrijavanje brže – manji utrošak goriva i vremena opetovanim taljenjem

Eksperiment simulacije arheološkog istraživanja – interpretacija arheološkog zapisa



Virje – Sušine, ostaci jamske peći



Produkt taljenja i otpad

- Dokumentiranje karakteristika talioničkog otpada – vrsta rude -
- utjecaj na proces, makroskopska diferencijacija

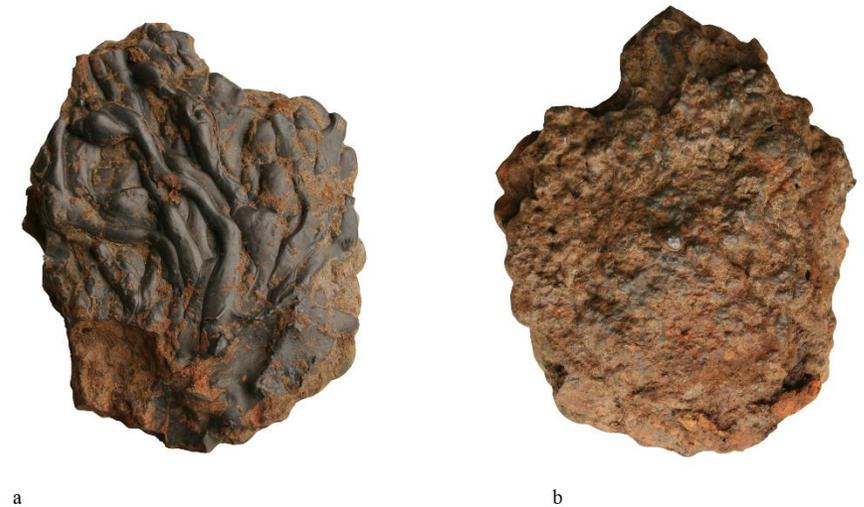


Stvaranje referentne zbirke –
prepoznavanje arheoloških nalaza i
usporedba

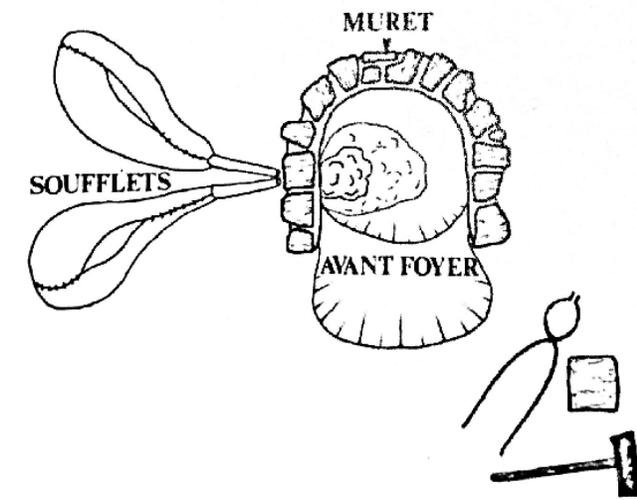
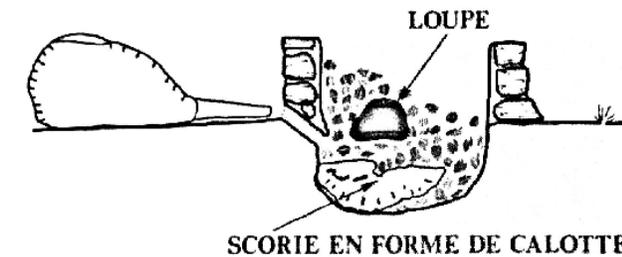
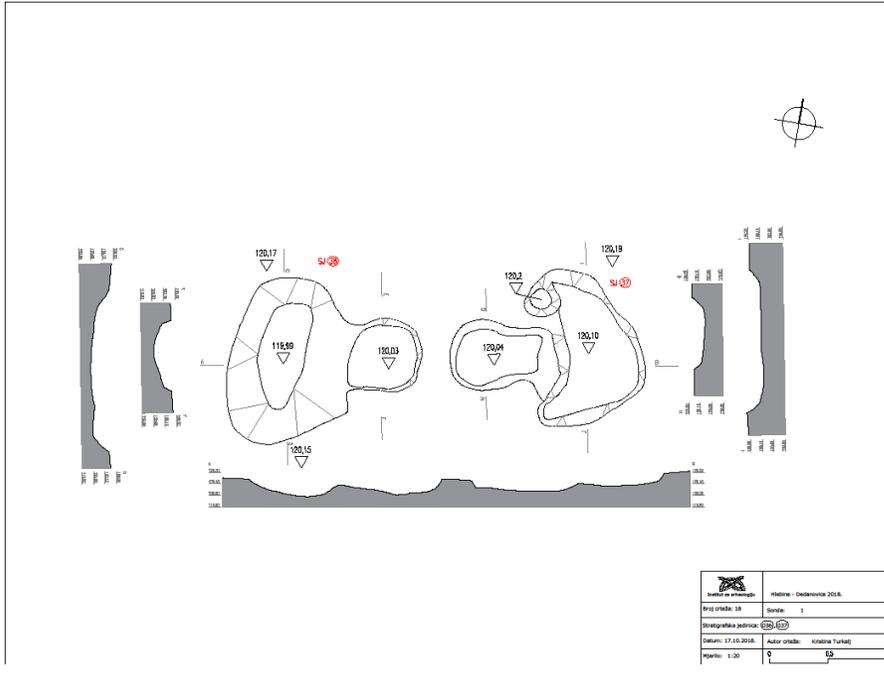
Procjena razine proizvodnje – količina
otpada koja nastaje taljenjem



Ispuštanje tekuće zgure, Koprivnica 2019.



Talionička zgura, Virje – Volarski
breg, kraj 8. / početak 9. st.



Hlebine – Dedanovice, poč - ½ 7. st.
istraživanje 2018. (foto: T. Sekelj Ivančan)

Ognjište za primarno
kovanje, lok. Boécourt,
Švicarska , 7. st.
(Echenlohr L., Seernels V.,
107, fig. 80)



Proces primarnog kovanja – konsolidacija spužvastog željeza



- Konstrukcija i funkcionalne karakteristike ognjišta
- Praćenje režima temperatura – vrijeme
- Dokumentiranje zapisa – usporedba s arheološkim zapisom
- Količina i karakteristike otpada
- Referentni uzorci





Eksperimentalna arheologija u svrhu popularizacije



- Usporedba funkcionalnih karakteristika različitih tipova peći - Promjene u tehnologiji – jamske peći i peći na istek – tehnološki napredak ili tradicijska razlika?
- Dokumentiranje količine i karakteristika proizvoda i otpada – Definirane razine produkcije u različitim vremenskim razdobljima
- Dokumentiranje utroška resursa i sirovina – razine eksploatacije
- Simulacija arheološkog istraživanja – interpretacija arheološkog zapisa
- Stvaranje referentne zbirke – šira dostupnost za interpretaciju nalaza

??? – ubikacija ležišta lokalne rude – mogućnost degradacije i nestanka uslijed suvremenih melioracijskih mjera i agrikulture na prostoru Podravine - potencijalno ograničeni zaključci u vezi s razinom produkcije i eksploatacije



Hvala na pažnji !