



KUMML 1986



# KUML 19 86

ÅRBOG FOR  
JYSK ARKÆOLOGISK SELSKAB

*With Summaries in English*

I kommission hos Aarhus Universitetsforlag, Århus

Omslag: Inspireret af lerkarornamentik fra Jernalderen.

*Udgivet med støtte af Statens humanistiske Forskningsråd*

---

*Redaktion: Poul Kjerum*

*Omslag: Flemming Bau*

*Tilrettelæggelse: Elsebet Morville*

*Special-Trykkeriet Viborg a-s*

---

*Skrift: Baskerville 11 pkt.*

*Papir: Stora G-print 120 gr.*

---

*Copyright 1988 by Jysk Arkæologisk Selskab*

---

*ISBN 87-7288-050-3*

*ISSN 0454 6245*

## Indhold/Contents

<i>H. Hellmuth Andersen</i> : Ringborgene og den militære begivenhedshistorie .....	7
Die Ringburgen und die militärische Ereignisgeschichte .....	17
<i>Lene B. Frandsen og Stig Jensen</i> : Hvor lå Ribe i Vikingetiden .....	21
Where was Viking Age Ribe? .....	34
<i>Thomas Fanning</i> : En irsk-nordisk bronze ringnål fra Ribe .....	37
A Bronze Ringed Pin with Hiberno-Viking affinities from Ribe .....	40
<i>Charlotte Fabech</i> : Stenkisten fra Blære .....	45
The megalithic cist at Blære .....	72
<i>Bjarne Lønborg</i> : Bronzestøbning i dansk Jernalder .....	77
Bronzecasting .....	93
<i>Jytte Ringtved</i> : Jyske gravfund fra yngre romertid .....	95
Late Roman and early Germanic Iron Age grave finds from Jutland. Tendencies in social development .....	219
<i>Jysk Arkæologisk Selskab 1986</i> .....	233

# Bronzestøbning i dansk jernalder

---

Af Bjarne Lønborg

I det følgende beskrives forsøg iværksat i forbindelse med »Langå-projektet«, der gennemføres af Fyns Stiftsmuseum og Historisk Værksted i Næsby. Her er det hensigten at fremstille en rekonstruktion af en fynsk udgave af Dejbjergvognen. Denne vogntype er fremstillet indenfor de sidste par århundreder før vor tidsregnings begyndelse, førromersk jernalders per. II-III, i en form og stil, der synes at have sine rødder i den keltiske La Tène tradition.

I den forbindelse er der foretaget en række forsøg med støbning af bronzebeslag og ornamenters svarende til dem, der har prydet jernaldervognen.

Disse støbte beslag er ganske tynde, omkring 1 mm, hvilket forudsætter en anden støbeteknik end den nuværende, hvor minimumstykkelsen på bronzestøbninger ligger omkring 3 mm.

Forskellen mellem nutidens og fortidens støbeteknik er først og fremmest formens temperatur i støbeøjeblikket. Hvor formene i dag har stuetemperatur i støbeøjeblikket, fremgår det af middelalderlige kilder om støbeteknik (1), at det indre af formene, der var lavet af ler, havde en temperatur på mindst 700° i støbeøjeblikket.

Forsøgene med fremstilling af beslagene er foretaget på grundlag af de nævnte skriftlige kilder og studier af det arkæologiske materiale, der belyser den fortidige støbeteknik. Det omfatter digler, forme, dele af blæsebælge, støbeaffald og selve fyrhullerne, hvori smeltning og støbning er foregået.

## Støbeprocessens forløb

Efter fremstilling af voksmodeller med påsatte støbetappe indpakkes disse i form-ler, en blanding af ler, sand/grus og en eller anden form for organisk materiale. Efter tørring brændes de færdige forme i bål. Under brændingen, der varer mindst halvanden time, gøres et fyrhul klar. Desuden samles bælg, avlrør og avlsten og samlingen mellem avlrør og avlsten tætnes med ler. (Fig. 1 og 2).

Efter optænding af trækullet blæses, indtil fyrhullets sider er tilpas varmet op. Herefter renses fyrhullet for nedfaldet sand og udbrændte trækulstykker, hvorefter det på ny fyldes op med frisk trækul, og der blæses, indtil der igen er god ild. Diglen fyldes med ituhakkede bronzestykker, der giver kortere smeltetid end ved anvendelse af én større klump, og anbringes ca.

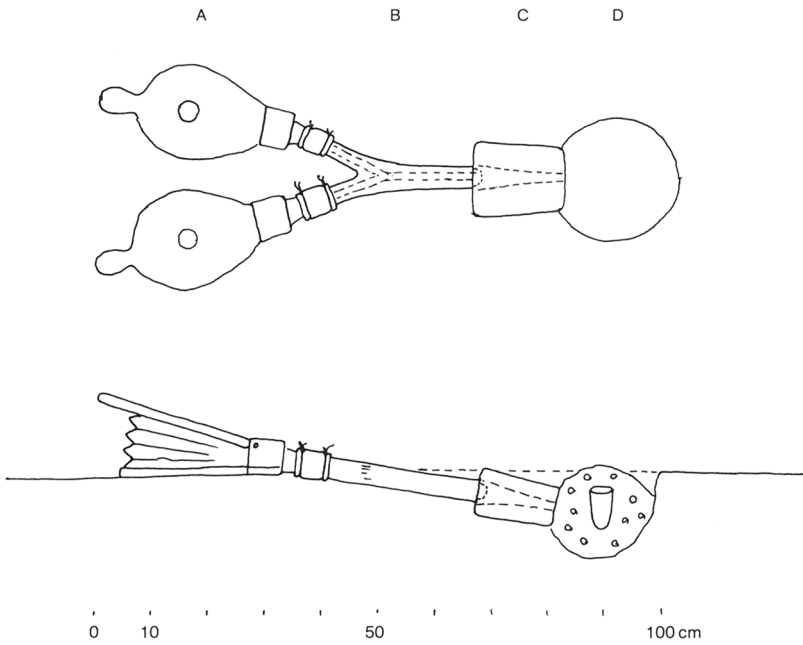


Fig. 1. Opstilling fremkommet ved forsøg udført 1984-85: A: Blæsebælg, B: Avlrør, C: Avlsten, D: Fyrhul.

The experimental arrangement used with bellows (A), tube (B), tuyère (C) and pit (D). This arrangement was arrived at during experiments carried out in 1984-1985. Scale 1:10.

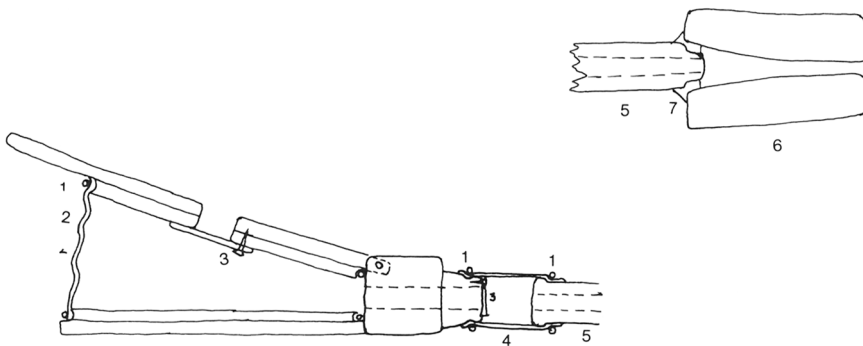


Fig. 2. Principskitser af snit gennem blæsebælg og forbindelse mellem bælg/avlrør og avlrør/avlsten. 1: Lædersnøringer, 2: Bælg, 3: Ventil, 4: Læderrør, 5: Avlrør, 6: Avlsten, 7: Lertætning.

Diagrammatic section through bellows and connections bellows/tuyère tube and tuyère tube/tuyère. 1: leather winding; 2: bellows; 3: valve; 4: leather tube; 5: tuyère tube; 6: tuyère; 7: clay seal.

10 cm foran avlstenens hul. Diglen dækkes med trækul og man begynder at pumpe med blæsebælgene.

Efter ca. 15 minutters pumpning med blæsebælgene er bronzen ved at være støbeklar. Diglen tages op af fyrehullet og der udstøbes så hurtigt som muligt. Når støbeformen er fyldt, hældes overskydende metal ud i en rende i jorden, hvorefter det øjeblikkeligt tildækkes med sand eller jord. Hvis denne tildækning ikke foretages, ødelægges en stor del af metallet ved iltning.

Når formene er ved at være færdigbrændte, vendes de, så indløbet vender opad og de forbliver i bålet under støbningen og afkølingen.

Når den udstøbte form er kølet ned til håndvarme, slås den i stykker, hvorved den støbte genstand frigøres og er klar til efterbearbejdning.

En éngangsstøbning vil ved ovennævnte fremgangsmåde vare mindst 2 timer ved en form på ca. 10 cm i diameter og med det anvendte ler. Hvis flere forme brændes samtidig, vil de efterfølgende støbninger vare ca. 30 min. hver.

## Formen

*Formleret.* Selv om dansk ler ikke hører til de ildfaste lerarter (2), kan det alligevel anvendes til forme, da de fleste danske typer ler har et sintringspunkt, der ligger på 1100° eller derover (3).

Danske lerarter indeholder også kalk, der under brænding afgiver CO<sub>2</sub>, som kan ødelægge støbningen. Den mest nærliggende løsning på dette problem er at forlænge formbrændingens varighed, indtil al CO<sub>2</sub> er spaltet fra. Brændingsvarigheden er således afhængig af lerets kalkindhold og varierer alt efter hvilken lerart der anvendes. Nogle lerarter er imidlertid uanvendelige på grund af andre forureninger, bl.a. af svovlkis.

Rent ler svinder ca. 10 % under tørring, så en tilsætning af andre materialer er nødvendig for at gøre leret formstabilt.

Gennem analyser af originale forme har det vist sig, at der er anvendt sand/grus og forskellige former for organisk materiale til denne magring.

Iblandes sand/grus som magring, modvirkes lerets svind under tørring. Sandet/gruset bør overvejende være skarpkantet, hvorfor strandsand eller åsand ikke er velegnet. Hvis alle sandkornene er afrundede, glider disse lettere mellem hinanden, og det vil derfor være sværere at få formleret bygget op om modellen. Sand/gruset består primært af kvartskorn (4), der er den varmeresistente bestanddel i blandingen. Blandingsforholdet mellem kvarts og ler er en balanceakt mellem, hvad der er ønskeligt og hvad der er nødvendigt. Det ønskelige er så meget kvarts som muligt, mens leret er det nødvendige bindemiddel (5) for at holde kvartskornene sammen og give formen tilstrækkelig styrke til at kunne modstå trykket fra den smeltede bronze.



Inderst mod modellen bruges fint sand (6), f.eks. istidsaflejret glimmer-sand, som magring. Herved opnås en passende glat overflade. I de ydre lag bruges grovere sand/grus.

Iblandingen af findelt organisk materiale i form af ko- eller hestemøg, dyrehår eller lignende, gør formvæggen porøs, så en del gasarter og luft kan undslippe ad denne vej. Endvidere nedsætter det organiske materiale risikoen for revnedannelse under tørring. Endelig vil det organiske materiale virke reducerende på metallet under støbning og afkøling, hvorved dannelsen af oxidhinder undgås, så rensning af metallens overflade efter støbning bliver unødvendig.

Det optimale blandingsforhold mellem ler, sand/grus og organisk materiale opnåedes dels ved forsøg, dels gennem de tidligere publicerede analyser af originalmateriale (7):

- ca. 60 % sand/grus
- ca. 35 % ler
- ca. 5 % organisk materiale.

Tallene repræsenterer tør vægt og procenterne er w/w. Forholdene kan dog veksle noget, da sand/grusets kornstørrelse indvirker på lermængden, også lerets kornstørrelse har betydning for tilsætningen af sand.

Fint sand kræver en større lermængde for at kunne holde sammen. Et materiale med lille kornstørrelse har langt større overflade-areal end et materiale med en stor kornstørrelse og kan derfor binde en større mængde ler. Når fint sand anvendes som magring, kan lerandelen stige til ca. 40 %, mens den ved groft sand/grus kan falde til ca. 25 %.

Glimmeret i sandet er uden betydning, da det udelukkende fungerer som magringsmiddel, idet glimmerholdige danske lerarter sintrer ved ca. 1000° (8).

Det grove sand/grus er sigtet morænegrus, der er en blanding af kvarts og feldspat. Feldspatten virker udelukkende som magringsmiddel, da den først sintrer ved ca. 1270° (9).

Mængden af organisk materiale er mere problematisk. Her er anvendt ca. 5 % savsmuld, men andelen i forhistorisk formmateriale kan have været noget større, da det organiske materiale under brændingen forkuller på samme måde som ved milebrænding af træ, hvor der forsvinder en stor del flygtige stoffer som vand, olier og kulbrinter.

Den eneste undersøgelse, der foreligger omkring indholdet af organisk materiale i støbeforme, er foretaget på 10,000 g formmateriale fra tidlig vikingetid (10). Denne analyse er imidlertid mangelfuld (11) og formene er til en specialiseret produktion, væsensforskellig fra den, der her forelægges.

*Formens opbygning.* Under støbningen skal luft og gasarter kunne undslippe, da bronzen ellers ikke vil kunne trænge ud i formen. Da porøsiteten i formvæggen ikke er tilstrækkelig til at lade dette ske, og luftkanaler først

blev opfundet ret sent i forhistorisk tid (12), er en speciel opbygning af formen nødvendig. Formene opbygges derfor i flere dele, hvor hver enkelt del får lov til at tørre helt eller delvist, før næste del opbygges. Ved enkle genstande opbygges formen af to halvdele, hvor delelinjerne fortrinsvis lægges langs kanter på modellen, hvorved efterbearbejdning lettes. Et slipmiddel på skillefladen kan være nødvendigt, f.eks. fedtstof eller brugt vaskeske (13), hvormed fladerne smøres. Begge dele blev afprøvet og fandtes brugbare. Det, eller de yderste lag påføres til slut over delelinjerne, så disse lukkes.

De enkelte lag i formen har en tykkelse på 5-8 mm, og formens endelige tykkelse afpasses nøje efter genstandens form og størrelse. Hvis formen er for tyk, vanskeliggøres brændingen; hvis den er for tynd, vil den bryde sammen og flække under støbningen (14), og hele arbejdet er forgæves. Når det sidste lag er påført, skal formen tørre godt.

*Formbrænding.* Formen må af flere grunde brændes, før støbning er mulig, bl.a. for at give den tilstrækkelig styrke, både overfor trykket, men også overfor varmekoket fra den smeltede bronze, der ellers vil sprænge formen.

Størstedelen af det kemisk bundne vand afgives lige før glødhede (ca. 500°). Herved sønderdeles lerminerallerne, sintring begynder, og plasticiteten går tabt. Leret har derefter styrke nok til at kunne modstå trykket og varmepåvirkningen fra den smeltede bronze. Før sintringen har formen ingen styrke og vil flyde hen igen, hvis den udsættes for fugtighed (15). (Fig. 3).

Brændingen skal tillige sikre, at forgasningen af alle organiske materialer er så langt fremskreden, at der ikke udvikles formgasser som kan resultere i huller eller gruber i den færdigstøbte genstand. (Fig. 4).

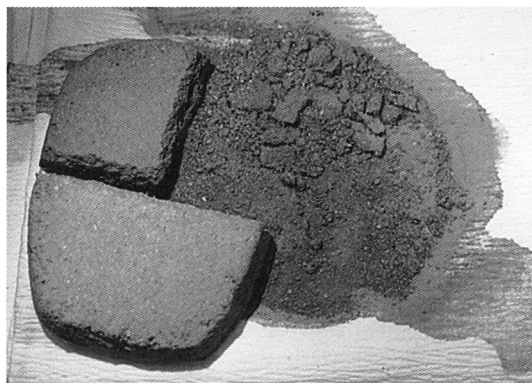


Fig. 3. Halvdelen af en plade tørret formler blev brændt i ovn ved 280 C. Efter afkøling blev halvdelen af denne lagt i vand og var næste dag opløst, d.v.s. at leret igen var blevet plastisk.

The half part of a slab of mould loam was fired in a kiln at 280°C. After cooling half part of this was placed in water. By the next day this quarter had been dissolved, i.e. the clay was again plastic.



Fig. 4. Den grubede og uldne overflade på bronzen genstanden skyldes, at den er støbt før afgasningen af det organiske materiale i formleret var afsluttet. Finnen midt på genstanden er bronze, der er trængt ud i samlingen mellem de to formhalvdele.

The pitted and woolly surface of a bronze object, cast before the gas had been driven from the organic material in the mould loam. The fin in the middle of the object is bronze which has intruded between the two halves of the mould.

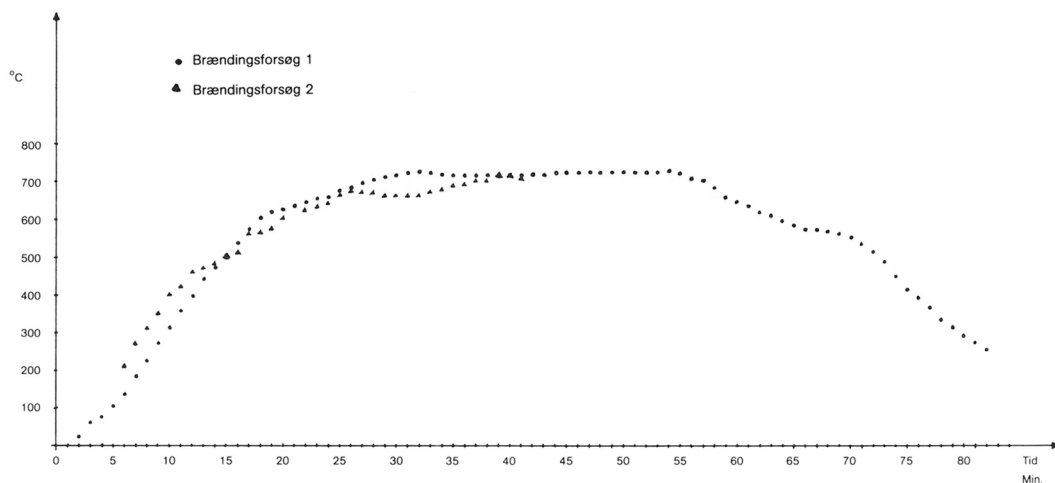


Fig. 5. Diagram over temperaturmålinger under brænding af to forme i et bål med egetræsbrændsel. Temperaturen blev målt med et termokors (Kromel-alumel termoelement).

Forsøg 1: Termokoret blev indbygget i en voksmodel med påsat støbetap og pakket i formler som ved almindelig støbning.

Forsøg 2: Måleudstyret blev anbragt mellem to forme- uden indpakning i formler.

Forskellen mellem måleresultaterne var minimal, idet det kun varede 12 minutter længere at opvarme formen i forsøg 2 til 700°C. Årsagen til forskellen syntes at skyldes en vinddrejning, så bålet lå mere i læ under dette forsøg. Forsøget blev afbrudt, da temperaturen var nået de 700°C.

Temperaturen blev aflæst hvert minut.

*Firing trial 1* shows the temperature during the firing of two moulds. The firing took place in a pyre fuelled with oak. The temperature of the mould was taken with thermocross (chromel-alumel thermoelement), encapsulated in a wax object with an applied casting gudgeon. The wax was then packed in mould loam, in the same way as the moulds employed in the casting. The temperature was read off every minute.

In *firing trial 2*, the same measuring appliance was placed without being packed in loam between two moulds. It was found that there was essentially no difference between the two trials. The difference was that the temperature in the second trial took 12 minutes more to exceed 700°C than in the first trial. This is probably due to the slight wind having veered slightly, so the fire was more protected in trial 2. When the temperature exceeded 700°C, the trial was stopped.

Disse forudsætninger kan opfyldes ved at brænde formen i et bål; men med den modifikation, at bålet opbygges (16), så formen er helt omgivet af brænde (egetræ), før bålet antændes. Formen anbringes lidt på skrå, med indløbsmundingen nedad, og bålet antændes i den side, hvor indløbsmundingen befinder sig. Ved denne fremgangsmåde opnås, at uds meltning og afbrænding af modellens voks foregår så tilpas jævnt og langsomt, at formen ikke sprænges under brændingen. (Fig. 5). Temperaturen når herved op på lige over 700° C. Når bålet er ved at være brændt ned, eventuelt efter gentagne pålægninger af brænde, er formbrændingen tilendebragt.

Under brændingen vil vokset og det organiske materiale i formvæggen forbrænde og forbruge al ilt i formen, hvorved man opnår en reducerende brænding; herved bliver skærven sort. Bålet i sig selv virker ligeledes reducerende. Når bålet er ved at være brændt ned, vil formens yderside blive udsat for iltens påvirkning, hvorved den bliver gul eller rød, afhængigt af forholdet mellem lerets indhold af jern og kalk.

Den sorte farve inde i selve formen stammer således ikke fra bronzens varmepåvirkning af det organiske materiale, men er et resultat af brændingen. Sålænge der hersker reducerende forhold omkring formen, optræder der forkullet organisk materiale i skærven, men ved iltningen af formens yderside forbrændes det organiske materiale her. I det gul- eller rødbrændte formmateriale optræder der således overhovedet ikke organisk materiale. Ved denne brændingsmåde har det gennem forsøgene vist sig, at der næsten ikke er forskel mellem forme, der var brændte og anvendte til støbning, og forme, der kun var brændte. (Fig. 6, 7, 8 og 9). Den eneste forskel var en svag gråligvid farvning, der optrådte pletvis, hvor bronzen havde været i direkte berøring med formmaterialet.

Ved forsøgene viste det sig også, at en form, der efter støbning afkøles med vand, bevarer den sorte farve i formens indre, mens forme, der køles

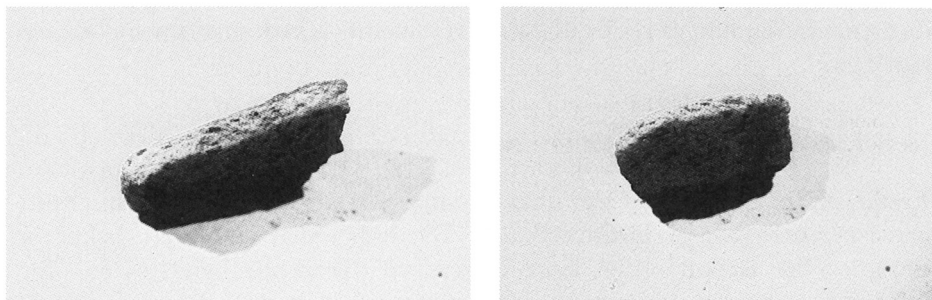


Fig. 6-7. To brudstykker af forme, der begge er brændt i samme bål. Kun formfragmentet til venstre har været benyttet til støbning, men begge viser oxyderende brændt, lys yderside og reducerende brændt, sort inderside.

Two mould fragments. Both have been fired in the same pyre, but casting has been carried out only in the mould from which the fragment on the left derives. Both show oxidized, pale outer surface and reduced black inner surface.

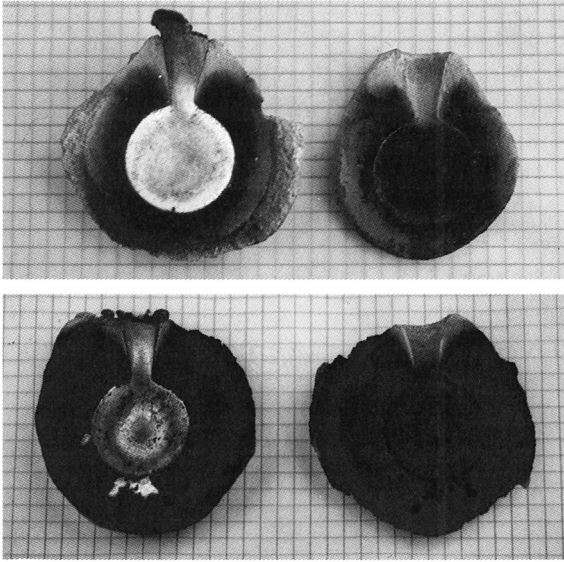


Fig. 8-9. Formens reducerende indre beskytter den støbte genstands overflade mod iltning. Fig. 8 viser en genstand, hvis form først blev brudt åben efter afkøling til håndvarme. Fig. 9: Formen blev brudt før afkølingen var tilendebragt, så metallet er blevet iltet på overfladen.

These figures show how the reduced inner surface protects the surface of the cast object from oxidation. The bottom picture shows an object whose mould was broken open before cooling had finished, whereby the metal surface had become oxidized.

langsomt, ofte viser iltende skærv hele vejen igennem, dog afhængigt af formens tykkelse.

Mange støbetappe har glat overflade på den del af støbetappen, der er fri af indløbets sider, medens andre viser en nærmest blomkålsagtig overflade.

Støbetappene med glat overflade må have størknet under reducerende forhold, medens de blomkålsagtige må have størknet under iltens påvirkning.

De glatte støbetappe opstår, hvor formen er forblevet i bålet under hele støbningsprocessen, indtil metallet er størknet. De blomkålsagtige overflader på tappene er derimod resultatet af en iltning, der er foregået, fordi formens indløb har været fri af bålet reducerende virkning, før metallet er størknet.

## Redskaber og udstyr til smeltning

*Fyrhul.* Af flere grunde er det u hensigtsmæssigt at foretage metalsmeltingen i et åbent bål på jordoverfladen. Da diglen skal være helt dækket af brænde eller trækul under brændingen, vil der skulle benyttes en uforholdsmæssig stor mængde brændsel for at opnå de nødvendige høje temperaturer. Desuden vil et åbent bål være uøkonomisk på grund af varmestrålingen, og heden omkring bålet vil samtidig gøre det vanskeligt at passe det og håndtere diglen under smelte- og støbeprocessen.

Disse ulemper kan afhjælpes ved at foretage uds meltingen i en ildgrube, omkring 20 cm i diameter og 20 cm dyb (17). Spor af sådanne fyrhuller

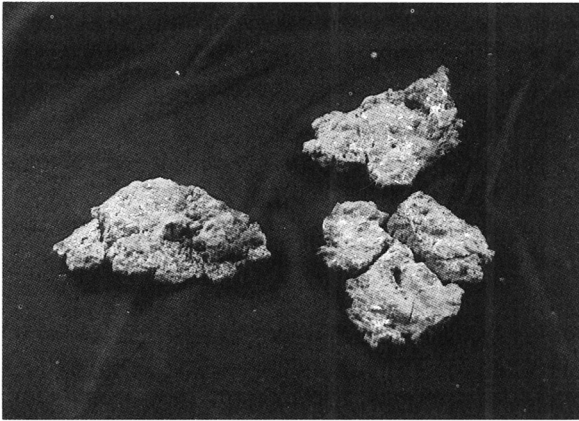


Fig. 10. Konkav/konvekse stykker af forglasset sand og jord fra fyrehullets skrå sider, som de fremkom ved forsøgene.

Concavo-convex pieces of vitrified sand and earth from the inclined sides of the casting-pit, formed during the experiments.

i form af konkav/konvekse flager af forglasset sand er fundet i støberilag fra vikingetid i Ribe (18).

En tilsvarende forglasning af sandet er ofte forekommet ved de her fremlagte forsøg (Fig. 10), hvor den konkave side er forglasset, medens den konvekse side består af sammenkittet sand og jord.

Dannelsen af disse forglasninger er afhængig af fyrehullets størrelse, således at et snævert fyrehul giver en kraftig forglasning, mens den aftager med større fyrehul.

*Digler.* Jeg har ved disse forsøg ikke forsøgt at fremstille digler, men udelukkende anvendt moderne digler af ildfast ler (højde 80 mm, største diameter 60 mm og volumen  $65 \text{ cm}^3$ ). Disse opfylder de samme krav, som har været stillet til fortidens digler, nemlig at de skal have styrke nok til at kunne tåle at flyttes i ophedet tilstand. Desuden skal de være af et materiale, hvis smeltepunkt ligger tilstrækkelig højt til at diglen kan tåle den temperatur (ca.  $1250^\circ \text{ C}$ ), der er nødvendig for at kunne smelte bronzen indenfor en rimelig tid, samt præstere det varmeoverskud, der kræves for at kunne udstøbe bronzen.

Der er imidlertid store temperaturgradienter i fyrehullet. Af fig. 11 ses, at der er et fald fra fyrehullets temperatur fra ca.  $1250^\circ \text{ C}$  til den smeltede bronzes på ca.  $1100^\circ \text{ C}$ .

Hvis man antager, at et lermaterials sintringstemperatur ligger på ca.  $1180^\circ \text{ C}$ , der er meget almindeligt for danske lerarter (19), vil diglernes ydervægge være sintret. Indersiden, der er dækket af flydende bronze (Fig. 12), vil derimod være upåvirket, fordi temperaturen aftager gennem digel-væggen. Så længe bronzen smelter, stiger dens temperatur ikke, da al den tilførte varme forbruges til smeltningen.

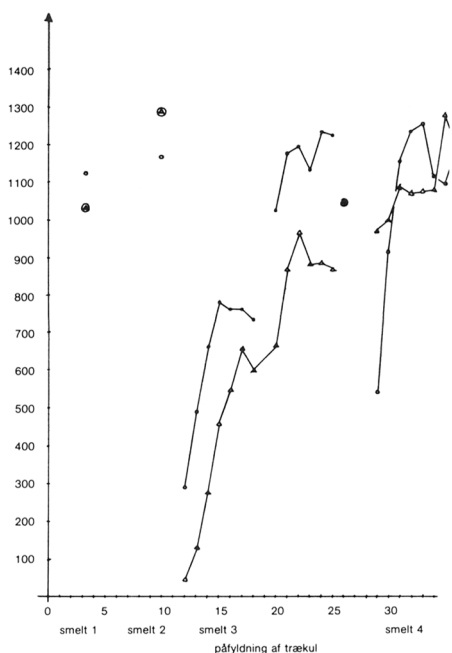


Fig. 11. ○ Fyrhullets temperatur ved siden af diglen.

△ Fyrhullets temperatur bag diglen-modsat avlsten.

⊙ Bronzetemperaturen umiddelbart før udstøbning.

Der blev foretaget flere smeltninger. Ved smelt 1 og 2 målt temperaturen kun umiddelbart før udstøbningen, ved smelt 3 og 4 hvert minut, to forskellige steder i fyrhullet under hele smeltesequensen. Det fremgår af kurverne, at det var vanskeligt at holde en ensartet temperatur i fyrhullet, men udsvingene er dog under 8%. (19B)

○ Temperature of the casting-pit beside the crucible.

△ Temperature of the casting-pit behind the crucible (away from the tuyère).

⊙ Bronze temperature just before casting.

Several melts were made. In melts 1 and 2, only temperatures just before casting were measured, in melts 3 and 4, every minute at two different spots in the casting-pit during the entire melting sequence.

At the side of the crucible, measurements were taken with a thermocross (Pt/Pt 10% Rh thermoelement), whilst the temperature behind the crucible was measured with another thermocross (chromel-alumel thermoelement) in a quartz tube. The latter was also used to measure the temperature of the bronze just before casting.

From the temperature curves it is seen directly that it is difficult to maintain a uniform temperature in the casting-pit, but the variation is still less than 8%.

Disse sintrede lag på diglerne er således et udtryk for, at temperaturen i fyrhullet har været højere end lerets sintringstemperatur og behøver ikke at indicere, at diglen har været repareret en eller flere gange. Sintringszonen fortæller derimod noget om, hvor mange gange diglen har været anvendt. I de tilfælde, hvor sintringszonen optræder på både yder- og inderside, må begge sider have været udsat for ophedning over lerets sintringstemperatur.

Sintringszonen kan i heldige tilfælde også vise, hvorledes diglen har været anbragt i fyrhullet. Det ses f.eks., at vikingetidens digler med sidetap (20) har været anbragt på skrå med tappen vendende opad. (Fig. 13).

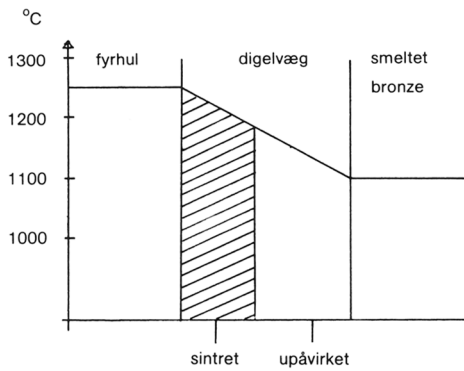


Fig. 12. Skematisk fremstilling af den partielle sintring af digelvæggen forårsaget af temperaturforskellen mellem yder- og indersiden. Da keramiske materialer er dårlige varmeledere, vil sintringen ikke brede sig videre.

This shows diagrammatically how a crucible wall will sinter partially due to temperature differences between outer and inner sides. The sintering zone will not spread further, ceramic materials being very poor conductors of heat.

Ved forsøgene viste det sig, at moderne digler af ildfast ler kun kunne tåle smelteprocessen 3-5 gange, før de revnede og skulle udskiftes. Dette betyder formentlig, at en forhistorisk digel af kvartsblandet, ikke ildfast ler, kun har kunnet tåle én eller to opvarmninger og nedkølinger i forbindelse med smeltning af bronze, før den brød sammen.

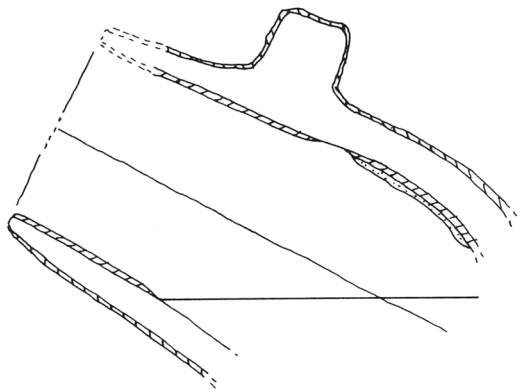
Dette fremgår da også af antallet af sintringszoner, der er påvist på forhistoriske digler.

**Tænger.** At digeltænger har været anvendt tidligt i jernalderen, fremgår bl.a. af en digel fra Manching, hvor tangens kæber har efterladt mærker i det halvmeltede og bløde digelmateriale (21). Man kan dog ikke ud fra disse mærker udlede noget om tangens udformning.

**Bælge.** For at få hævet temperaturen til ca. 1250° C i fyrhullet og holde den der, indtil bronzen var støbeklar, har det været nødvendigt med en eller anden form for dobbelt bælganordning. En sådan har været uomgængelig nødvendig for at opnå en kontinuerlig luftstrøm, ligesom det har været en

Fig. 13. Udtægning af digel fra tidlig vikingetid, Ribe. Skraveringen angiver sintringszoner. Hvor den smeltede bronze har dækket diglens inderside forekommer ingen sintring. Den vandrette linie markerer den smeltede bronzes overflade og viser, at diglen har stået skråt under smeltningen. (Efter Brinck Madsen 1984).

Drawing of a crucible from the early Viking Period, Ribe. The hatched areas are sintering zones. Where the molten bronze has covered the inside of the crucible, a sintering zone does not occur. From this it can be seen that the crucible must have stood at a slant during the melting. The horizontal line indicates the surface of the molten bronze. After Brinck Madsen, H. 1984.





absolut betingelse, at man har været fuldt fortrolig med bælgens virkemåde. Blot nogle små variationer i blæsehastigheden fører til temperaturudsving i fyrehullet. Blæses der for lidt, falder temperaturen, så bronzen ikke kan smelte, blæses der for meget, vil diglen smelte.

I forsøgsopstillingen havde hver bælg et rumindhold på ca. 6 l luft. Systemets maksimale temperatur blev målt til 1380° C ved 4-5 pumpe­slag pr. sekund, og det var umuligt at få bælgene til at arbejde hurtigere. Ved ca. 1 pumpe­slag pr. sekund opnåedes 1185° C.

*Avlrør.* Afbildninger fra vikingetiden og tidlig middelalder af blæsebælg (22) viser ikke avlrør. Det kan skyldes, at det på dette tidspunkt havde vist sig, at sådanne rør var unødvendige. Da disse afbildninger imidlertid viser bælg i forbindelse med smedning af jern, er der også den mulighed, at avlrør er unødvendige i forbindelse med en smede­esse.

Fra førromersk jernalder kendes et eksempel på et avlrør fra Hjort­springfundet (23). Det er af træ, og dets størrelse passer med en samtidig avlsten fra den keltiske borg Manching (24).

For at få ringe modstand i avlrøret skal indersiden være jævn og glat, ligesom det er nødvendigt, at hullerne fra avlrørets tre grene rammer hinanden nøjagtig i samme punkt. Hvis udboringerne er unøjagtige og sidegrenenes huller ligger lidt forskudt i forhold til hinanden, vil luftgen­nemgangen nedsættes, og der vil være risiko for eksplosioner i bælgene (25).

For at luften fra bælgene kan overføres til fyrehullet, skal samlingerne mellem bælg/avlrør og mellem avlrør/avlsten også være tætte. Hvis disse tætninger ikke er i orden, kan fyrehullets temperatur ikke hæves tilstrækkeligt til at bronzen smelter. Avlrøret fra Hjort­spring viser, at samlingerne mod bælgene, der kan have været læderrør, må have været bundet fast, måske med læderremme. Samlingen og tætningen mod avlstenen har dog også kunnet foretages med ler, hvilket jeg har prøvet i den viste opstilling.

*Avlsten.* En avlsten har flere funktioner. Den skal beskytte mod varmen fra fyrehullet og samtidig virke som en slags dyse, til at koncentrere luftstrømmen og dirigere dens retning.

Foran avlstenen stiger varmen lodret tilvejs, og forglasningen og smeltningen af forsiden på avlsten af ler viser, at de fleste har været anbragt lidt på skrå med forsiden nedad (26).

Forsøgene blev udført med en rekonstruktion af samme type som en avlsten fra Manching (27), fremstillet af ler magret med en tilsvarende mængde tørt sand/grus. Efter formning som blok og udboring af hullet blev den tørret i 6 døgn og derefter forglødet i ovn ved 800°.

Efter forglødning blev den anvendt til 8 smeltninger fordelt over et par dage. Under brugen viste der sig ingen problemer, men efter at have stået

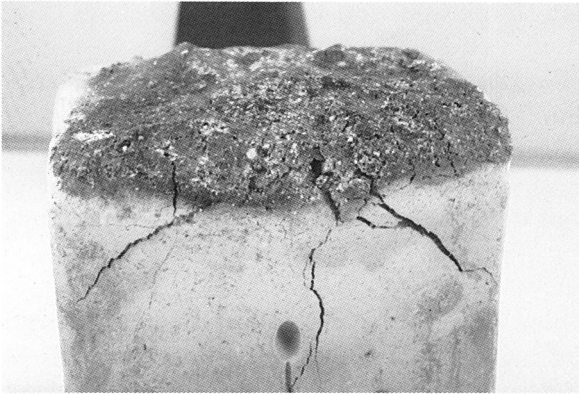


Fig. 14. Forsiden af en avlsten efter 8 smeltninger. Man ser her forglasningen med begyndende krakelering.

Front of tuyère after 8 melts. One sees the vitrification with incipient crackling.

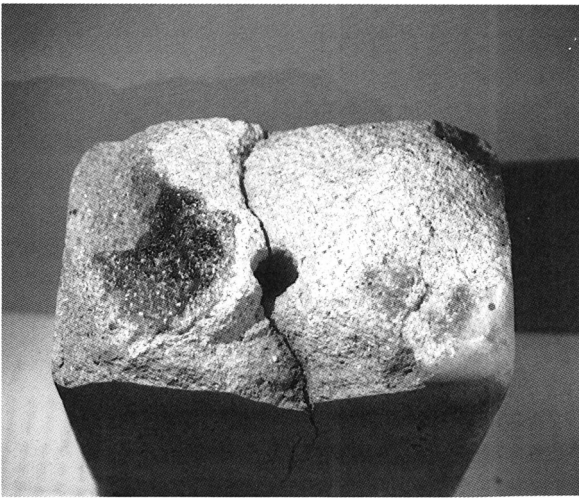


Fig. 15. Samme avlsten som fig. 14 efter yderligere 5 smeltninger, hvor den krakelerede forglasning er faldet af.

The same tuyère after a further 5 melts and after the vitrification formed during these had cracked and fallen off.



Fig. 16. Afstødt, sintret, krakeleret materiale fra avlstenen. Tiøren angiver størrelsesforholdet.

Sintered, cracked, exfoliated material from the tuyère. A 10-øre coin (diameter 1.8 cm) shows the size.

ubenyttet i ca. 3 uger var dens forglasede forside stærkt krakeleret (Fig. 14) og begyndt at falde af.

Kort tid efter var hele det forglasede område faldet af. (Fig. 15). Herefter blev den anvendt til endnu 5 smeltninger i løbet af 1 dag, hvorved ny forglasning dannedes på forsiden. Efter ca. 2 ugers forløb var denne forglasning krakeleret og faldet af. Det forglasede, afstødte materiale (Fig. 16) må være det samme, som det i litteraturen omtalte »sintered clay« (28).

*Brændsel.* Et par smeltninger blev, uden problemer, udført med egetræ som brændsel. I forhold til trækul tog det blot mere tid og krævede hårdere arbejde ved bælgene, og i resten af forsøgene blev der anvendt trækul fremstillet af løvtræ.

Den bedste varmeverkning opnåedes ved brug af trækulstykker ca. 6 cm lange og ca. 2 cm i diameter. Brændselsforbruget lå ved smeltning af 250-300 g bronze (en digelfuld) på ca. 1 kg. trækul.

*Bronze.* Ligesom ved diglerne er også bronzen, der anvendtes til forsøget, fremstillet kommercielt (29). Fra leverandøren oplystes, at bronzen indeholder

Cu	83,5 %
Sn	11,0 %
Pb	3,0 %
Zn	1,0 %
P	1,0 %
Ni	0,5 %

Dette er ikke ren tinbronze, men forureningerne kan, for de flestes vedkommende, direkte sammenlignes med de forureninger, der forekommer i mange forhistoriske bronzelegeringer.

### Smeltning og støbning

Når ovennævnte forhold var i orden (digel, fyrhul, bælg, avlrør, avlsten og brændsel), foregik bronzesmeltingen uden større problemer. Smeltningen af en digelfuld bronze tog gennemsnitlig omkring 15 minutter. Den korteste smeltetid var 12 minutter, regnet fra det øjeblik, da den kolde digel blev sat ned i fyrhullet til støbningen var foretaget. Den længste smeltetid var 20 minutter.

Støbetemperaturen, der for mange bronzer ligger indenfor intervallet 1060-1140° C (30) (Fig. 17), var ikke vanskelig at opnå. Det var vanskeligere at nå at få støbt, inden bronzen var kølet for meget af. Efter at diglen er

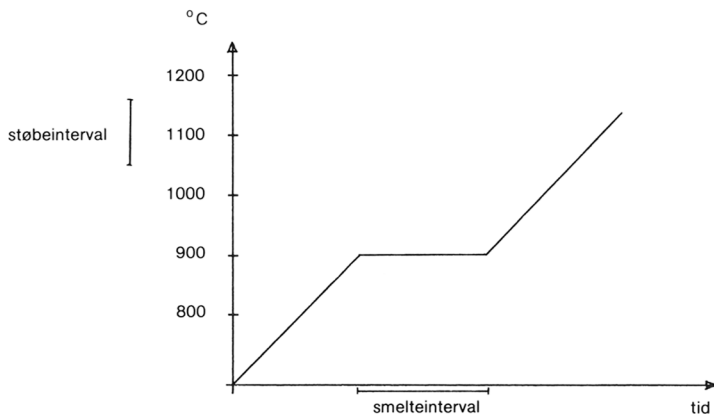


Fig. 17. Diagram over temperaturen i bronze under konstant varmetilførsel. Under selve smeltningen sker ingen temperaturstigning i bronzen, da al tilført energi forbruges i selve smelteprocessen. Det fremgår også, at bronzens smeltetemperatur og støbetemperaturen ikke er sammenfaldende. En støbning, der foretages ved en temperatur under støbeintervallets, vil som regel mislykkes.

This shows diagrammatically the temperature increase in bronze under constant heating. During the actual melting, the temperature of the bronze does not increase, since all energy added is consumed in the actual melting process. At the same time it is seen that the fusion temperature of the bronze and its casting temperature are not the same. A casting that takes place at a temperature below that of the casting interval is in great risk of failing.

taget op af fyrehullet, har man således kun mellem 3-5 sekunder (31) til at foretage støbningen i, da bronzen ellers er kølet så meget af, at støbningen vil mislykkes.

Det store problem var at kunne bedømme den smeltede bronzes temperatur. Denne bedømmelse kunne kun læres ved at sammenholde resultaterne fra en række støbninger med forholdene ved de tilsvarende smeltninger.

Bedømmelsen af formtemperaturen var lidt lettere. Formen skal være rødglødende, altså over ca. 700° C (32). Efter indisk tradition skal indløbs-hullet have samme farve som »græskarblomster« (33), og et lignende sammenligningsgrundlag kan udmærket tænkes brugt i forhistorisk tid i Europa.

Udover de her fremlagte resultater fremkom endnu ét, som jeg i starten af forsøgene ikke havde forventet. Det viste sig, at selv den enkleste støbning kun meget vanskeligt kan gennemføres af én mand. Da afkølingshastigheden for opstillingen og dermed for den smeltede bronze er meget stor, kræver processen, at én mand konstant arbejder med blæsebælgene. Der er ikke tid til at slippe bælgene, tage diglen ud og foretage udstøbningen. En ekstra mand er derfor påkrævet til at tage sig af formbrænding, efterpåfyldning af trækul i fyrehullet, samt selve udstøbningen.

Mange problemer og problemstillinger indenfor jernalderens bronze-støbning blev i disse forsøg end ikke berørt og er derfor endnu uafklarede. Ved ovennævnte fremgangsmåde har det vist sig muligt at gennemføre



Fig. 18. Kopi af vikingetidssmykke, der er støbt efter den angivne metode.

Example of a copy of a Viking object cast according to the method described.

vellykkede støbninger, hvor det færdige produkt svarer nøje til den genstand, der skulle kopieres. (Fig. 18).

Mange har hjulpet til ved forsøgene, både med råd og dåd. Vi takker alle varmt for deres indsats, uden hvilken forsøgene ikke havde kunnet gennemføres. En særlig tak rettes til civilingeniør V. F. Buchwald, Danmarks Tekniske Højskole.

#### NOTER

- 1) Theophilus presbyter: *Diversarum artium Schedula. Liber tertius. Cap. LX & LXXXIV.* Oversat af Wilhelm Theobald. Berlin 1933. Og M. V. Krishnan: *Cire perdue casting in India.* New Delhi 1976, p. 5.
- 2) P. Hald: *Keramikkens teknik, med en indledende kemi.* Kbh. 1947. p. 88 f.
- 3) P. Hald, som ovenfor, note 2, p. 123-125.
- 4) S. H. Andersen & H. Madsen: *Et førromersk bronzestøberi fra Vitved i Østjylland.* (i *Hikuin* 10) 1984. p. 91 & 97. Og B. Hulthén. 1977. p. 51-53 i E. Roesdahl: *Fyrkat, en jysk vikingeborg II. Oldsagerne og gravpladsen.* (I *Nordiske Fortidsminder, Ser. B, in 4°, No. 4.*) Kbh. 1977.
- 5) S. H. Andersen & H. Madsen, som ovenfor, note 4. p. 91 & 98.
- 6) Langåvognens bredringe (FSM No. D. 1254) har bevaret karnedele i vulsternes indvendige hulheder. Ved mikroskopisk undersøgelse konstateredes, at leret er magret med meget fint sand.
- 7) H. Brinch Madsen: *Ribe Excavations 1970-76. Vol. II (Ed. M. Bencard).* Esbjerg 1984. p. 33.
- 8) P. Hald, som ovenfor, note 2. p. 85.
- 9) P. Hald, som ovenfor, note 2, p. 85 & 102.
- 10) H. Brinch Madsen, som ovenfor, note 7, p. 33.
- 11) Organisk materiale vil kun forekomme i den del af formen, der er reducerende brændt. På ydersiden, hvor ilten har haft adgang, vil alt organisk materiale være brændt væk, hvorved analysen kan være vildledende.
- 12) K. Lamm: *The manufacture of Jewellery during the Migration period at Helgö in Sweden.* (I *Bulletin of the Historical Metallurgy group. Vol. 7, No. 2.*) London 1973, omtaler her forhistoriske forme med luftkanaler.

- 13) V. Biringuccio: *Pirotechnia*. Venedig 1540. Genudgivet af The M.I.T. Press. Cambridge, Mass. p. 162.
- 14) Eksempler på sådanne, under støbningen flækkede forme ses bl.a. hos: T. Ramskou: *Politikens Danmarkshistorie*. Bd. II (Ed. J. Danstrup & H. Kock) Politikens Forlag. Kbh. 1963, p. 406. Og hos A. Oldeberg: *Metallteknik under vikingetid och medeltid*. Stockholm 1966. Fig. 148.
- 15) P. Hald, som ovenfor, note 2, p. 84.
- 16) Grundideen til denne fremgangsmåde er fremkommet under diskussion med fil. cand. Birgitta Hulthén, Keramiska Laboratoriet, Historiska Museet, Lund, som hermed takkes for inspirerende samtale.
- 17) Fyrhuller er beskrevet flere steder i den arkæologiske litteratur. Bl.a. hos:  
E. Roesdahl: *Fyrkat, en jysk vikingeborg II. Oldsagerne og gravpladsen*. (I *Nordiske Fortidsminder*. Ser. B, in 4°, No. 4.) Kbh. 1977. p. 44.  
E. Roesdahl: *Danmarks vikingetid*. Kbh. 1980. p. 116. Og  
L. Alcock: *Dinas Powys, an iron age, dark age and early medieval settlement in Glamorgan*. Cardiff. 1963. p. 26.
- 18) H. Brinch Madsen, som ovenfor, note 7, p. 30.
- 19) P. Hald, som ovenfor, note 2, p. 88 f.
- 19b) Temperaturen ved siden af digelen målt med et termokors (Pt/Pt 10% Rh termoelement), mens temperaturen bag digelen målt med et andet termokors (chromel/alumel-element) i kvartsrør. Dette sidste blev også anvendt til måling af bronzens temperatur, umiddelbart før udstøbningen.
- 20) H. Brinch Madsen, som ovenfor, note 7, p. 121.
- 21) G. Jacobi: *Werkzeug und Geräte aus dem Oppidum von Manching*. (I *Die Ausgrabungen in Manching*. Bd. V (Ed. W. Krämer)) Wiesbaden 1974. Fig. 1800.
- 22) Sigurdristningen fra Ramsund, Södermannland og portalstolpen fra Hyllestad kirke. Illustreret hos P. V. Glob: *Avlsten*. Kuml. Århus 1959. Omblad og p. 69.
- 23) J. Brøndsted: *Danmarks Oldtid*. Bd. III. Kbh. 1940. Fig. 24 i.
- 24) G. Jacobi, som ovenfor, note 21, Fig. 1805-1809.
- 25) Mundtlig oplysning fra Arne Granberg, der har fremstillet og arbejdet med denne type blæsebølge og avlrør gennem 5 år i Historisk Værksted, Næsby.
- 26) G. Jacobi, som ovenfor, note 24, og P. H. Hallinder: *Fyrsidiga blästerpipskydd av lera*. Stockholm 1972. (I *Årsrapport (Helgö) 1972*). Fig. 2.1
- 27) G. Jacobi, som ovenfor, note 24.
- 28) H. Brinch Madsen, som ovenfor, note 7, p. 30.
- 29) Indkøbt hos metalstøberi Joh. Jensen & Søn, Glostrup.
- 30) Mundtlig oplysning fra bronzestøber Jørn Svendsen, Hollufgård, Odense samt H. Drescher: *Der Überfanguss*. Mainz 1958. p. 8.
- 31) K. Lamm, som ovenfor, note 11., p. 6, som omtaler samme forhold.
- 32) Mundtlig oplysning fra V. F. Buchwald. DTH.
- 33) M. V. Krishnan: *Cire perdue casting in India*. New Delhi. 1976. p. 5.

## SUMMARY

---

### Bronzecasting

This article presents the results of experiments with bronzecasting in Iron Age context, carried out in connection with the reconstruction of the Langå Waggon, a Funen version of the Dejbjerg waggon type. The experiments have been carried out by Fyns Stiftsmuseum and Historisk Værksted, Næsby. The processes employed have been based on written medieval sources (1) and archaeological material illuminating the prehistoric casting technique. This comprises crucibles, mould parts, parts of bellows, casting waste and the actual casting pits where melting and casting have taken place.

For the moulds, loam has been used, in order to obtain a material which is stable in shape. The proportions depend on the grain sizes of the materials used. In the present instance, the blend is c. 60 % sand/gravel, c. 35 % clay and c. 5 % organic material. It is desirable that there be as large a quantity of quartz (4), the heat-resistant part, as possible, although clay is of course necessary to bind the quartz grains together (5). The moulds consist of several parts, the parting faces serving as "air vents".

In order to use a loam mould for bronze-casting, it has to be fired, or it will shatter during casting. Likewise the temperature of the mould at the moment of casting is critical (700°C) (Fig. 5). During the firing, all oxygen in the crucible is consumed, and the body is therefore reduction-fired and black. The black colour is thus a result of the firing and not of the heat from the bronze at the moment of casting. The outside is open to oxygen during the cooling and is therefore yellow or red.

Melting proved to occur best in a pit, c. 20 cm in diameter and c. 20 cm deep (16). During melting, concavo-convex pieces were formed on the sides of the hole, the concave side becoming vitreous (17) (Fig. 10).

The metal and crucibles were in the present experiment both of commercial origin. These crucibles of fireproof clay could withstand only 3-5 melts however, before they broke. Prehistoric crucibles of non-fireproof clay could therefore only have endured fewer melts before breaking. Prehistoric crucibles often exhibit a sintered outer surface where the temperature has been so high that the clay has become vitrified. These sintering zones could, but do not necessarily, indicate repairs, but do show how many times the crucibles have been used for melting.

It has proved absolutely necessary to employ double bellows in order to maintain a continuous stream of air, since the bronze cannot otherwise melt and achieve casting temperature. It is also vital that all joins in the assembly shown (Fig. 1 and 2) be tight.

In front of the tuyère, the heat rises vertically, so the vitrification of the front end of the tuyère shows that it was placed somewhat at a slant, with the front end down. The vitrified clay will after a time fall off and occur as "sintered clay" (27) (Fig. 15 and 16).

When these conditions were present, it took on average c. 15 minutes to melt 250-300 g bronze. The rate of cooling for these small amounts of bronze is very high, however, so casting has to be completed within 3-5 seconds (30) after the crucible is removed from the fire.

One major problem is how to judge when the melt is hot enough. This can be learned only by comparing the results of a number of castings with the conditions present at the corresponding meltings.

Estimation of the temperature of the mould is slightly easier. The mould must be red hot, i.e. over 700°C (31). According to Indian, medieval tradition (32), the colour of the ingate should be that of "marrow flowers" and a similar rule of thumb might have been used in prehistoric Europe.

In addition to the results presented here, a further unexpected result was obtained: it proved impossible for one man to perform a casting. The rate of cooling of the system was too high, so two men were required to carry out successful casting by the method described.

Many persons have helped with the experiments, in word and deed. We thank them all for their assistance, without which the trials could not have been carried out. Especial thanks are due to civil engineer V. F. Buchwald, Danmarks Tekniske Højskole.

*Bjarne Lønborg*  
Fyns Stiftsmuseum  
Odense

*Oversættelse: Peter Crabb*