Univerzita Hradec Králové
Filozofická fakulta

E-learningový kurz

Modern quantitative methods and shape analysis in archaeology

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tento materiál vznikl v rámci realizace projektu Strategický rozvoj Univerzity Hradec Králové, reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002427.

FF UHK

Outline analyses

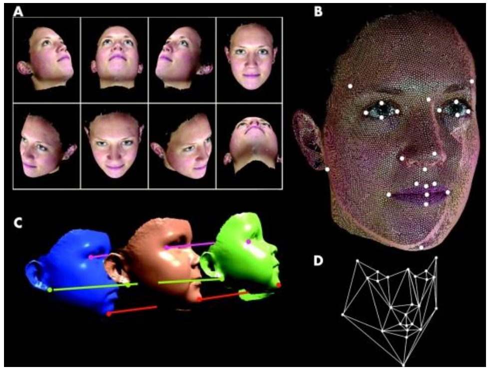
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

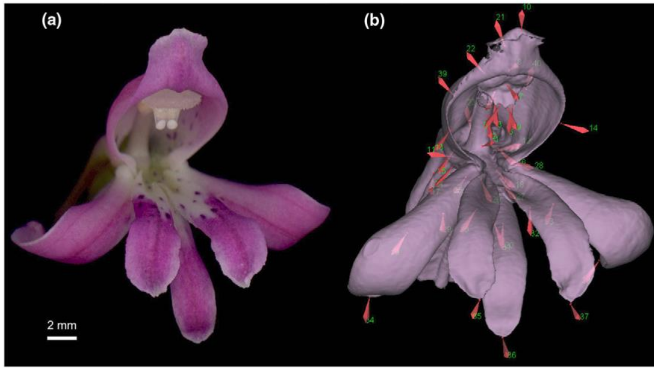
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

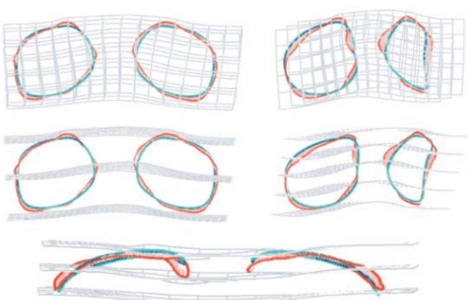
Workflow

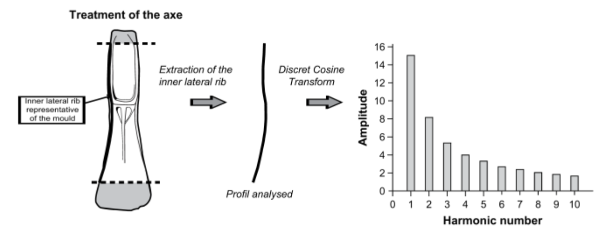
Landmarks analyses





Outline analyses





www.anarchiel.com
Králík et al. 2008
van der Niet et al. 2011
Urbanová 2009
www.biology-online.org
Forel et al. 2009

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Workflow

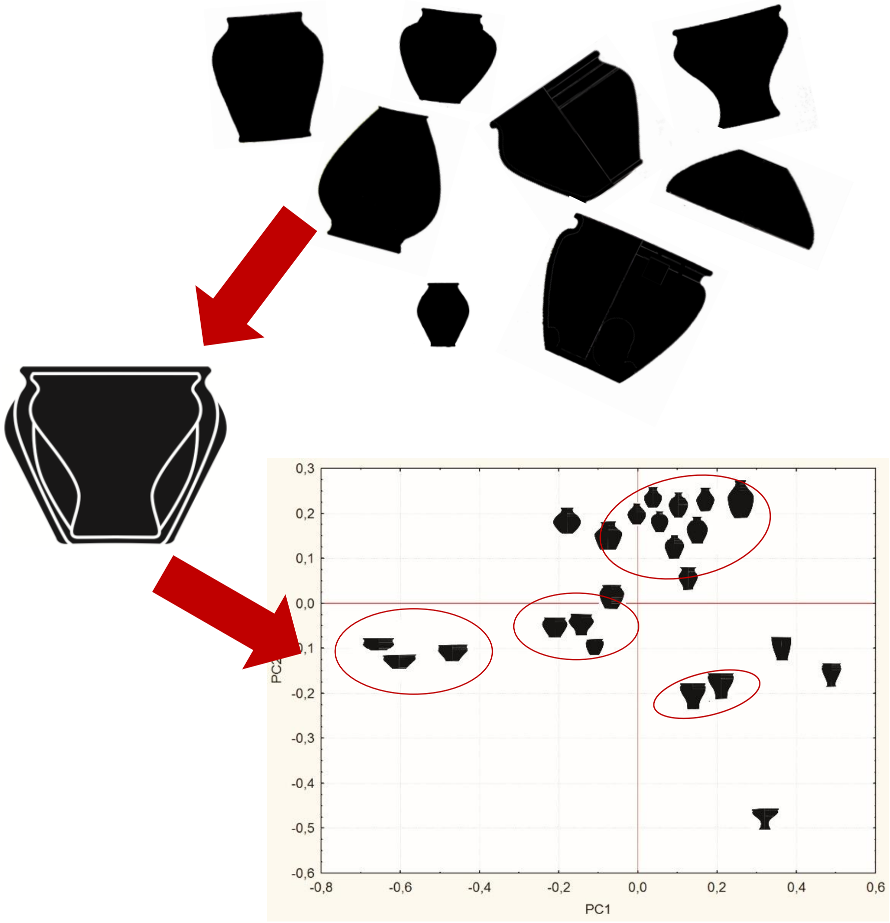
1) Data collection

2) Standardisation

(position, size and orientation)

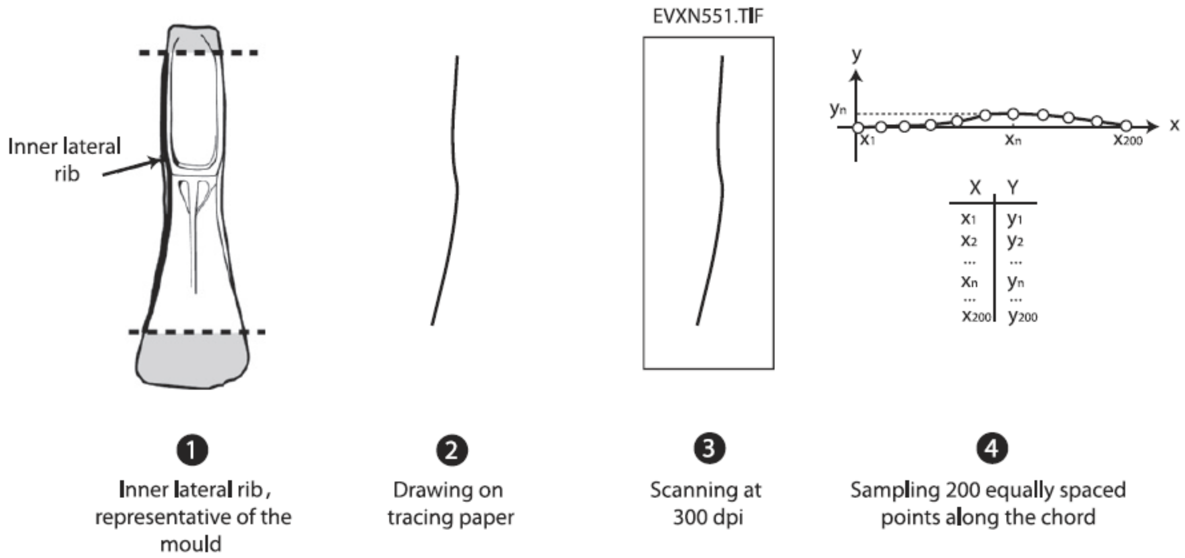
3) Calculation of shape variables

4) Data treatment and visualisation



Semilandmarks (Open outlines)

xy-coordinates of points traced along an outline



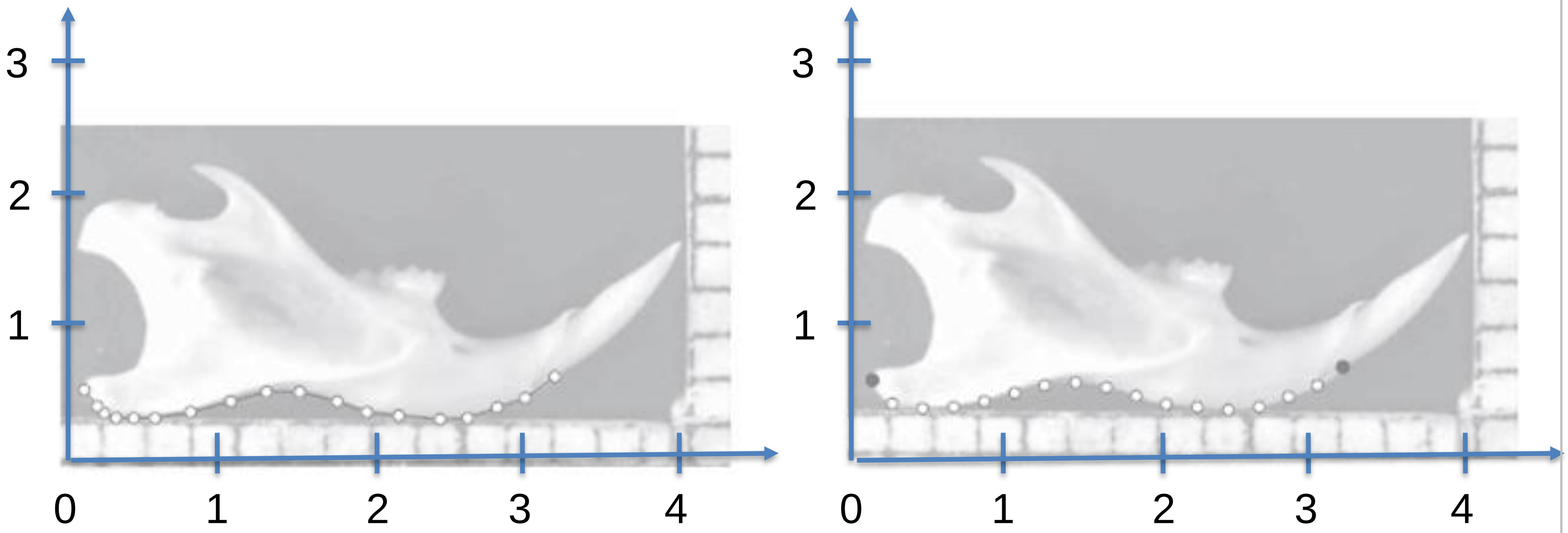
Zelditch et al. 2004

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

2D data collection

Semilandmarks (Open outlines)

xy-coordinates of points traced along an outline



Claude 2008

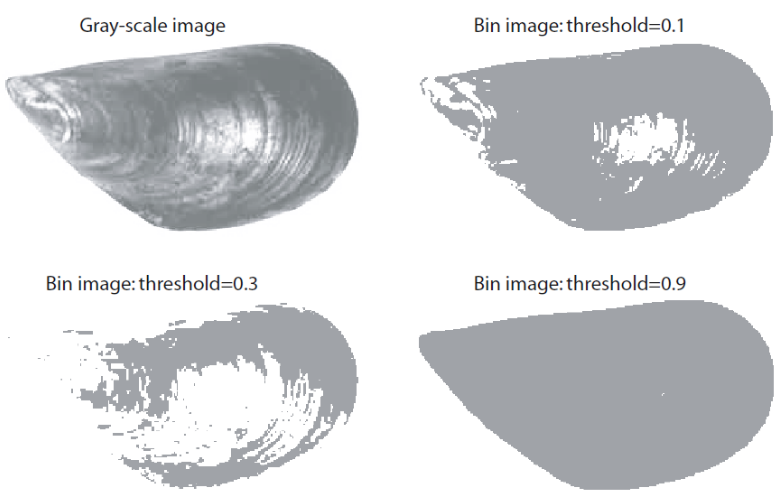
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

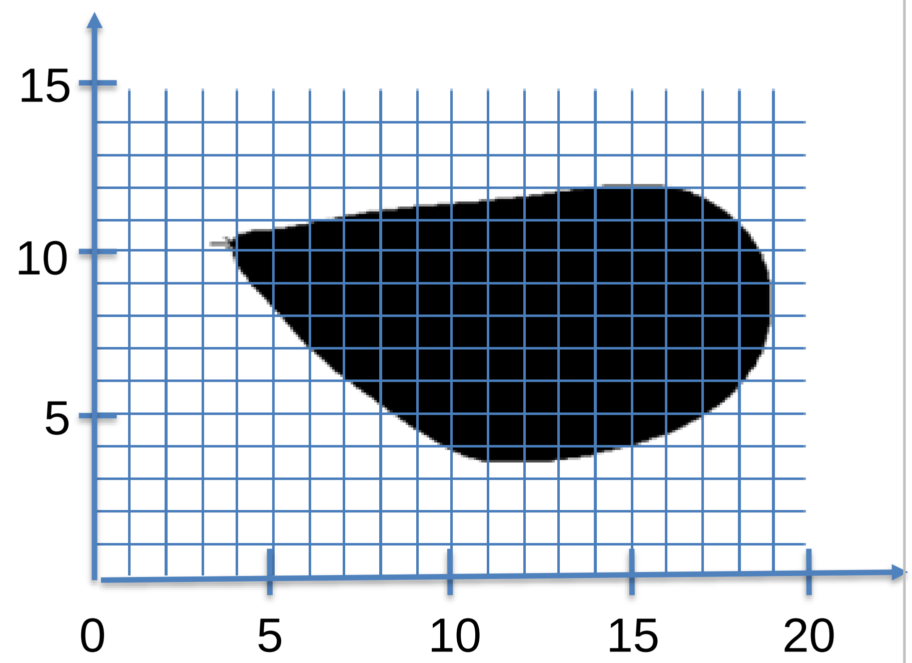
FF UHK

2D data collection

Semilandmarks (Closed outlines)

automatic xy coordinates extraction



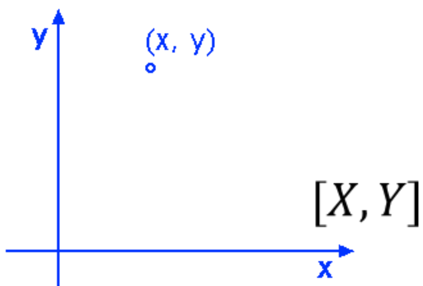


Claude 2008

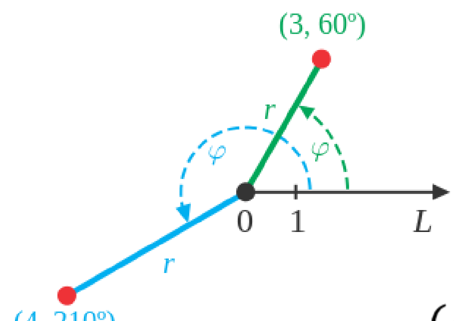
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

Semilandmarks

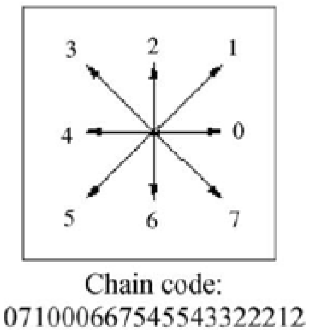


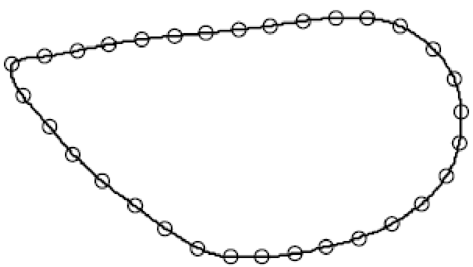
curvilinear



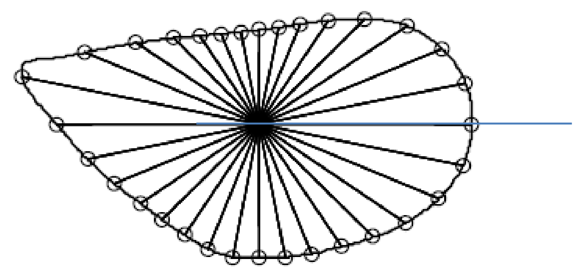
polar

(L, φ)

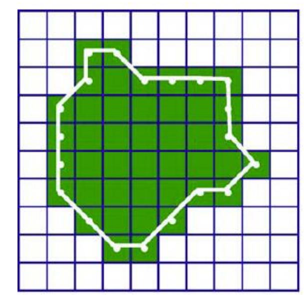




equally spaced segments



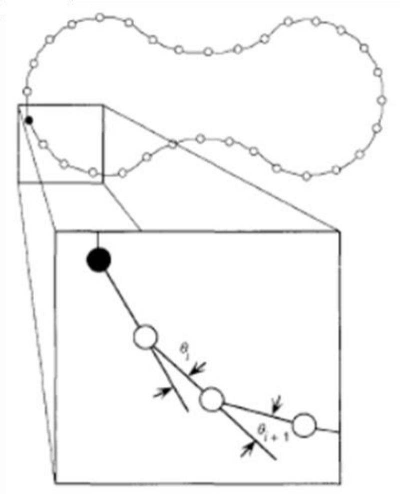
equally spaced angles



chaincode

Tangent angles

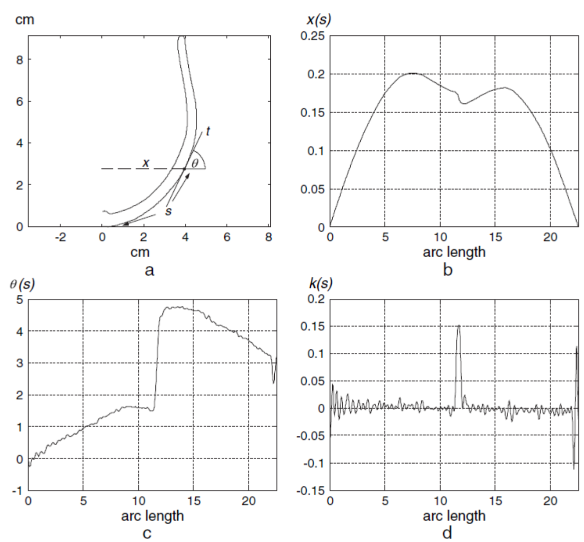
Curve is expressed as series of angles between semilandmarks Phi function (Zahn and Roskies shape function) => eigenshape analysis

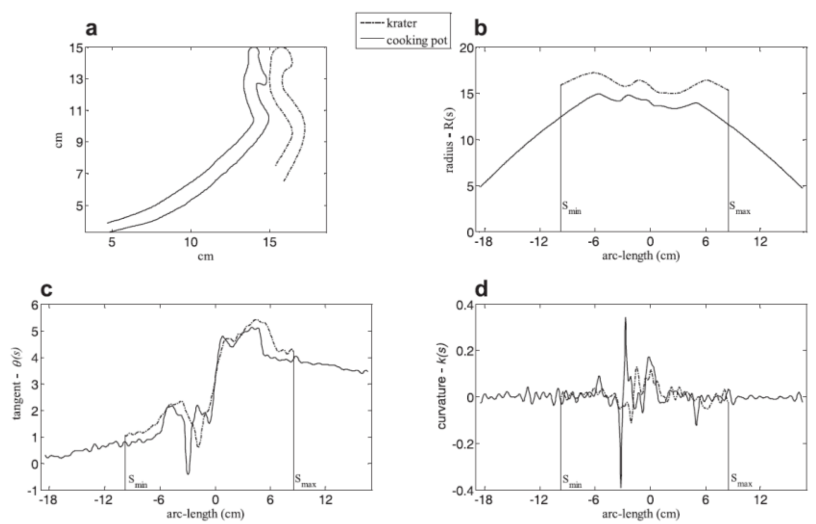


MacLeod, 1999

Radius, tangent and curvature function

Artefacts (often pottery profiles) are sometimes expressed by **radius function**; **tangent/slope function** (1st derivate), and **curvature function** (2nd derivate)





Saragusti et al. 2005
Karasik and Smilansky 2011

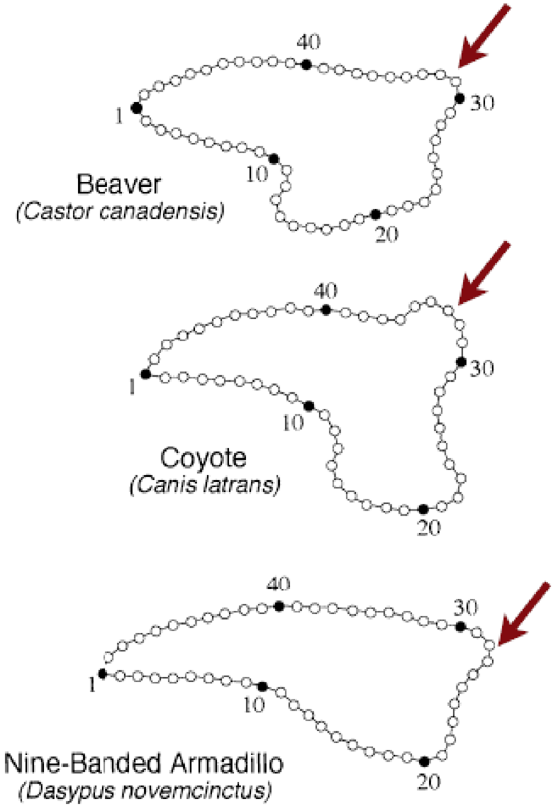
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Problems with homology semilandmarks

It does not have effect **overall** similarities/differences between shapes

It may be hard to locate parts which are similar/different



MacLeod, 1999

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

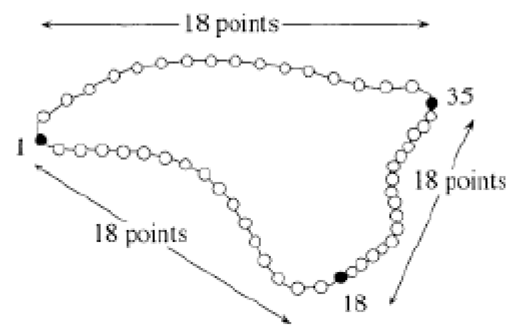
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

2D data collection

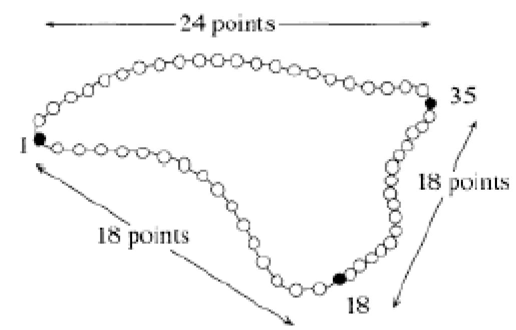
(Partial) solution = Extended eigenshape

Landmarks for homologous points and semilandmarks between them

A) The same number of semilandmarks on each segment



B) Number of landmarks in each segment varies based on its complexity

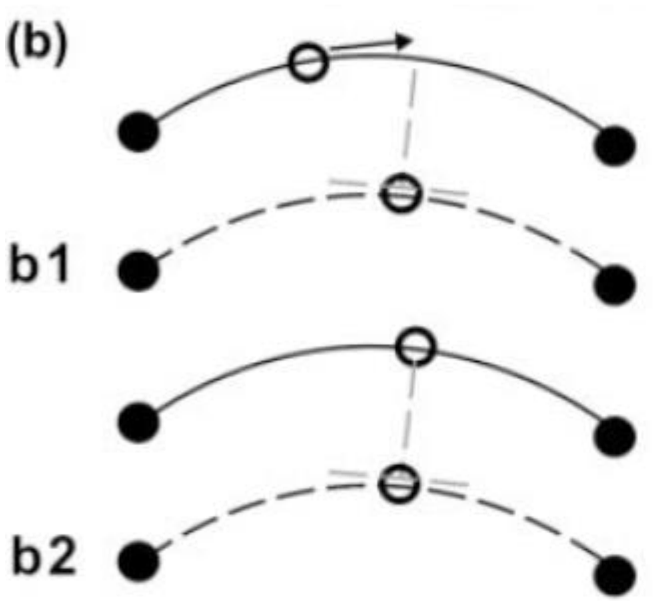


MacLeod, 1999

(Partial) solution = Sliding semilandmarks

Semilandmarks are iteratively “sliding” along outline until the best correspondence is found

Finding minimums by using Procrustes distance or Bending energy



MacLeod, 1999

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

Workflow

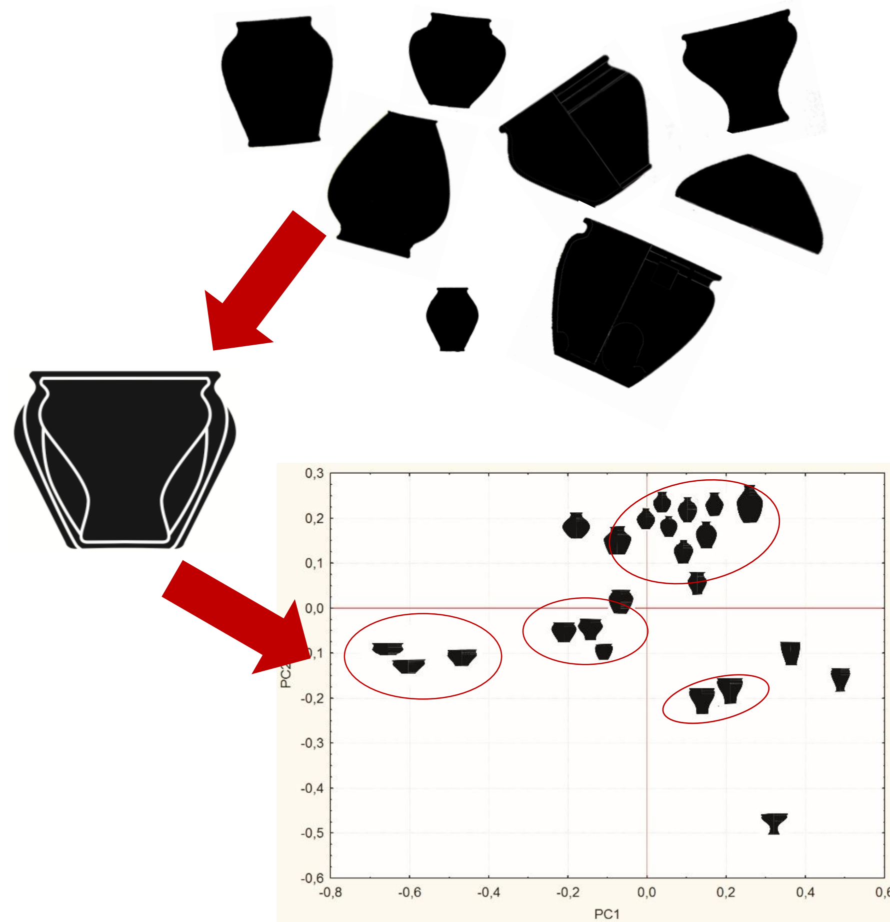
1) Data collection

2) Standardisation

(position, size and orientation)

3) Calculation of shape variables

4) Data treatment and visualisation



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Standardization

Outlines are standardised in the same way as landmarks

Functions representations are standardised by (i) the length of curvilinear abscissa, (ii) by arc-length, or (iii) by perimeter

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

Workflow

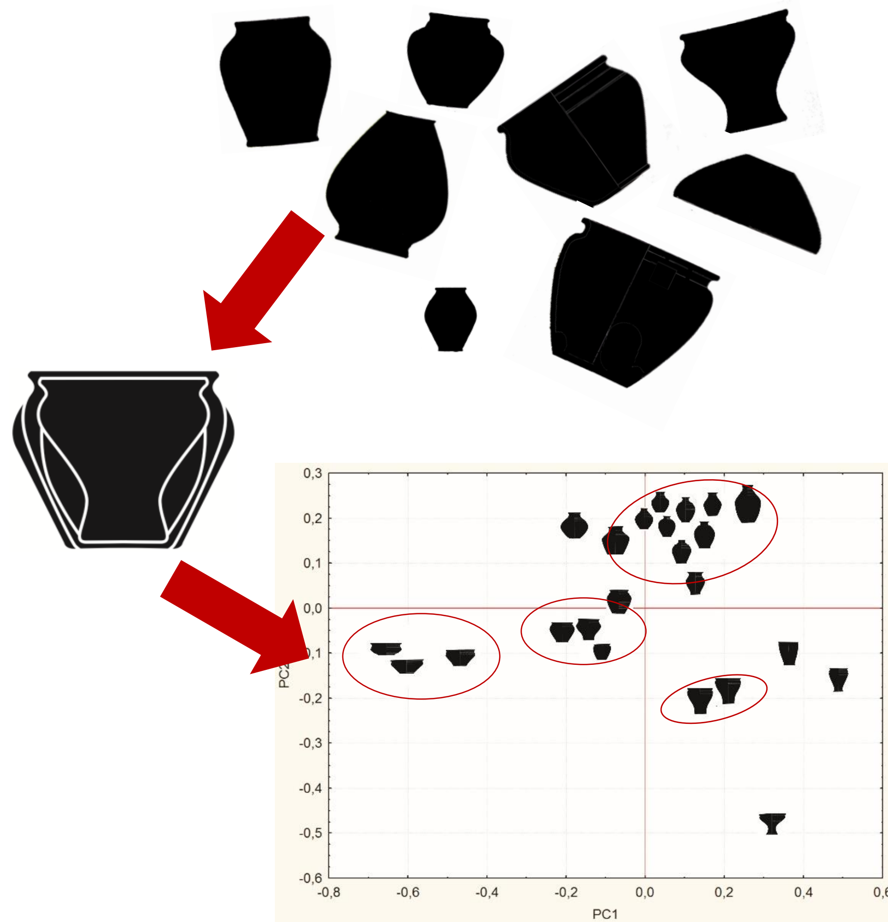
1) Data collection

2) Standardisation

(position, size and orientation)

3) Calculation of shape variables

4) Data treatment and visualisation



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Calculation of shape variables

Semilandmarks => Procrustes analysis

Sliding semilandmarks => Procrustes analysis

Angles/Functions => directly

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

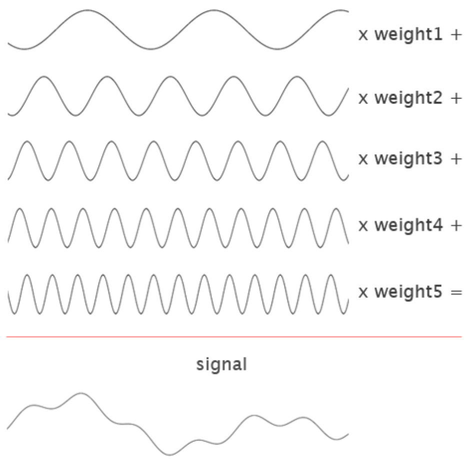
Calculation of shape variables

Discrete Cosine Transform (DCT)

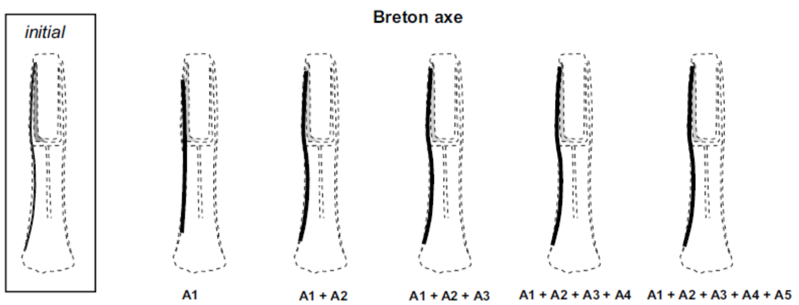
Uses harmonics (trigonometric cosine waves) to describe shape

Principle:

1) Each outline can be viewed as a signal and can be decomposed into the sum of waves (**harmonics**)
2) Each wave is expressed by **2 coefficients**
3) If we sum the coefficients, we can reconstruct the original shape **(Inverse transform)**



$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} c[k]s[n]\cos\left(\frac{(2n+1)k\pi}{2N}\right)$$



FF UHK

Calculation of shape variables

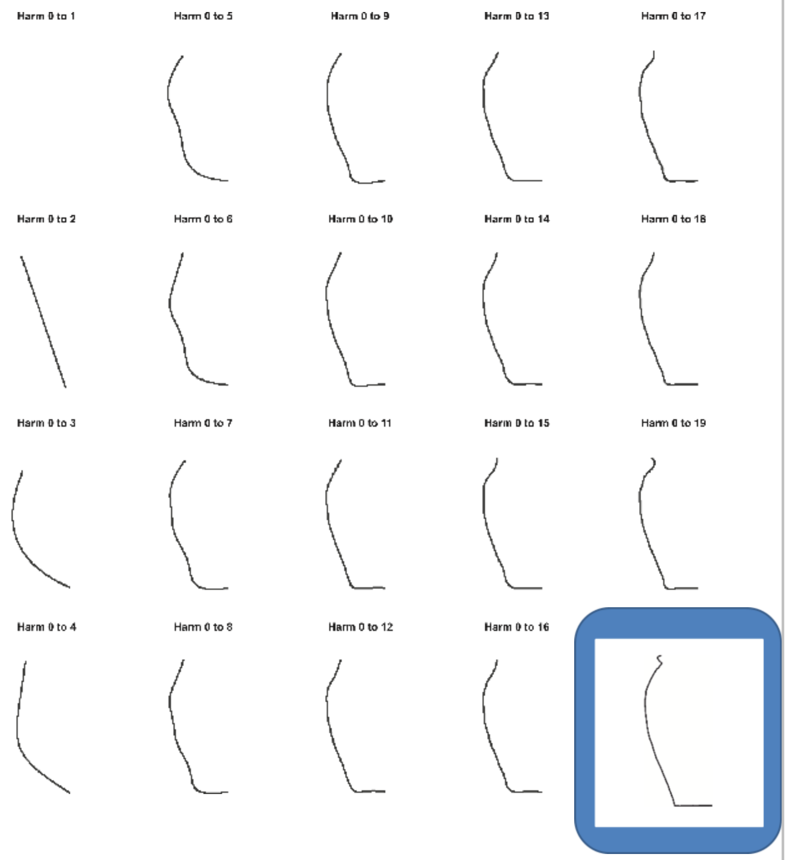
Discrete Cosine Transform (DCT)

Uses harmonics (trigonometric cosine waves) to describe shape

Principle:

1) Each outline can be viewed as a signal and can be decomposed into the sum of waves (**harmonics**)
2) Each wave is expressed by **2 coefficients**
3) If we sum the coefficients, we can reconstruct the original shape **(Inverse transform)**

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} c[k]s[n]\cos\left(\frac{(2n+1)k\pi}{2N}\right)$$



FF UHK

Calculation of shape variables

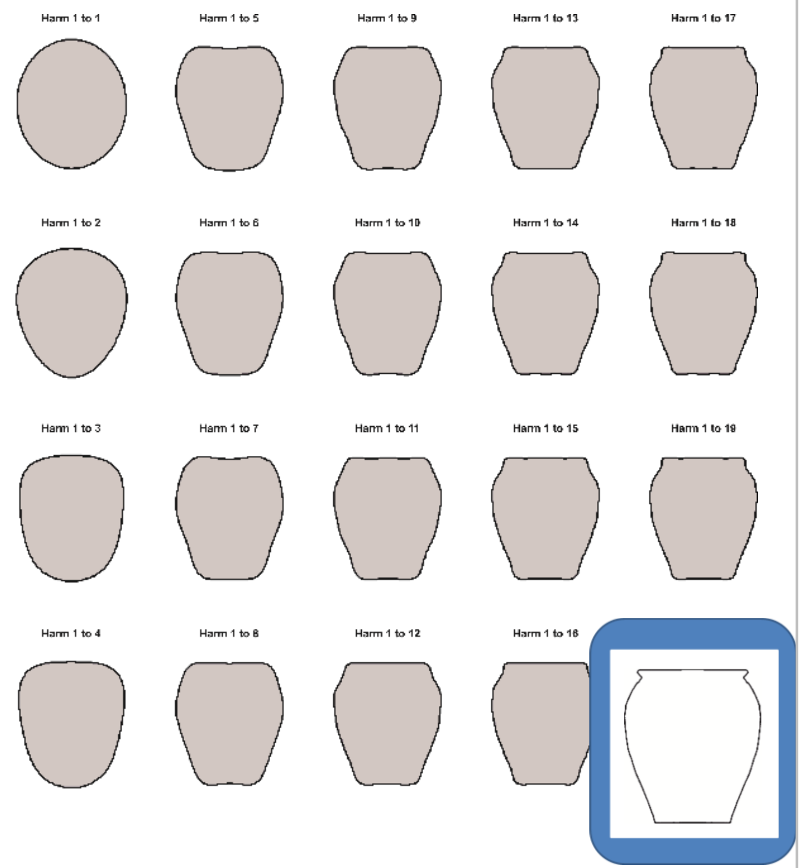
Elliptic Fourier Analysis (EFA)

Uses harmonics (trigonometric sine and cosine waves) to describe shape

Principle:
1) Each outline can be viewed as a signal and can be decomposed into the sum of waves (**harmonics**), representing **ellipses**
2) Each wave is expressed by **4 coefficients**
3) If we sum the coefficients, we can reconstruct the original shape **(Inverse Fourier transform)**

$$x(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{k} a_j \cos\left(\frac{2j\pi t}{T}\right) + \sum_{j=1}^{k} b_j \sin\left(\frac{2j\pi t}{T}\right)$$

$$y(t) = c_0 + \sum_{j=1}^{k} a_j \cos\left(\frac{2j\pi t}{T}\right) + \sum_{j=1}^{k} d_j \sin\left(\frac{2j\pi t}{T}\right)$$



Calculation of shape variables

Normalised EFA (NEFA)

Normalisation according to the first ellipse
First three coefficients become constant
Usually, we do not use 1st harmonic in calculations

Nyquist criterion

Maximum number of harmonics equal half the number of coordinates

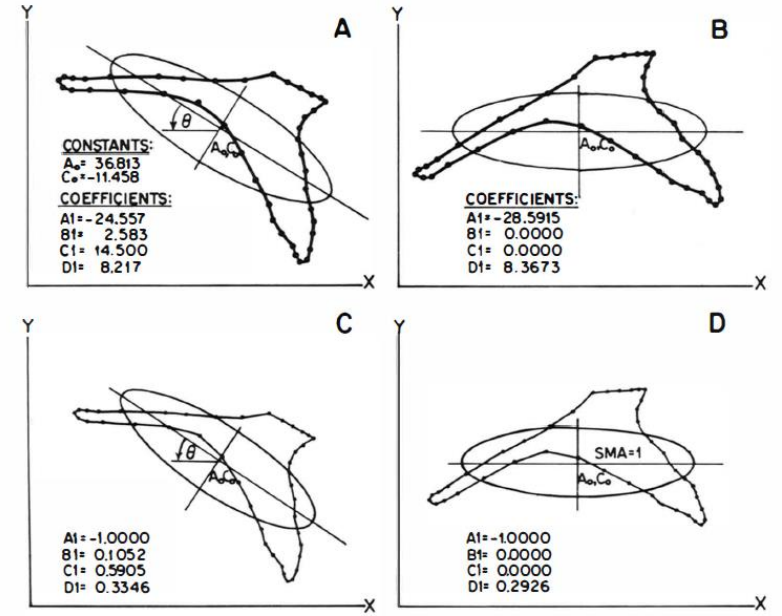


Fig. 5. Four theoretically possible normalizations. A: *No* positional-orientation and *no* size-standardization. B: Positional-orientation but *no* size-standardization. C: *No* positional-orientation but with size-standardization present. D: Both positional-orientation and size-standardization present. See text for further discussion.

Lestrel 1989

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

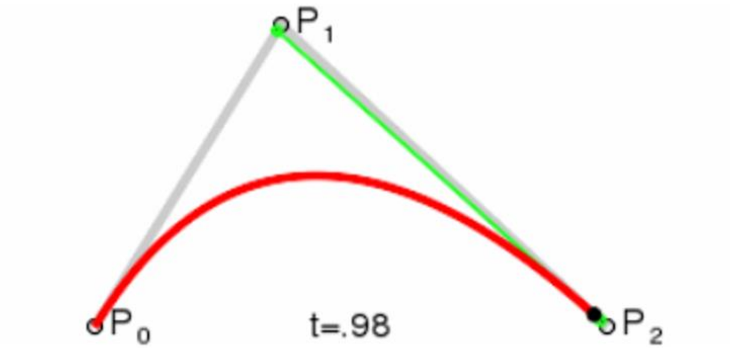
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Calculation of shape variables

Bezier Polynomials

Fitting a curve to an open outline

A Bezier polynomial of degree q is a function that passes to a sequence of $q + 1$ points
(e.g. for 10 points we can have Bezier polynomial of degree 9)



www.wikipedia.org

Decomposition of original coordinates into two matrices:

$$M = JB$$

M is the original configuration
J is a $q \times q + 1$ matrix of Bezier coefficients
B is a matrix of coordinates for the Bezier vertices

B used as shape variables

Wikipedia.org

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

FF UHK

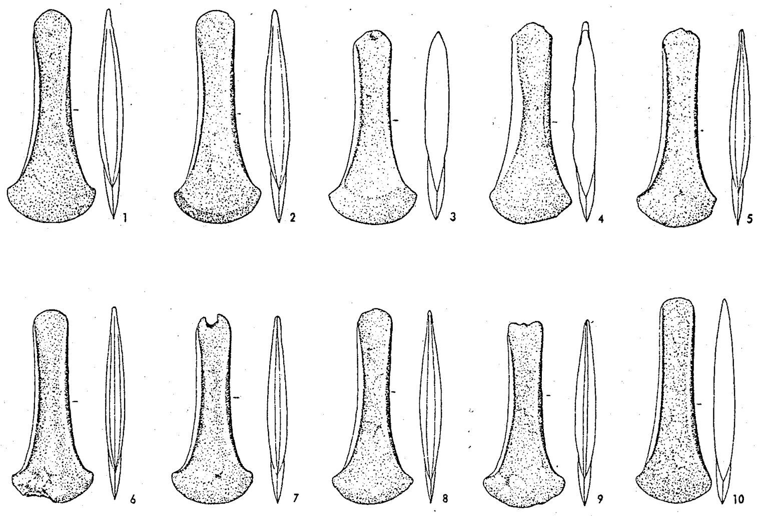
Case study

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Case study on Flanged axes

Middle Bronze Age axes (1650-1350 BC)



Wilczek et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

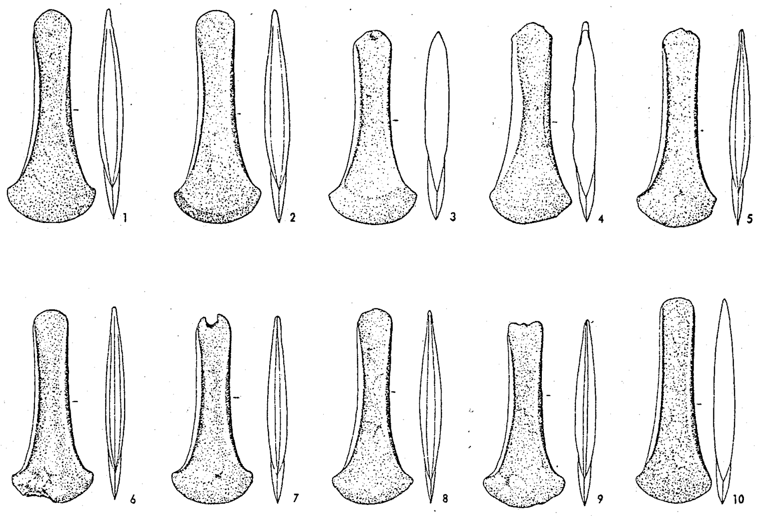
Case study on Flanged axes

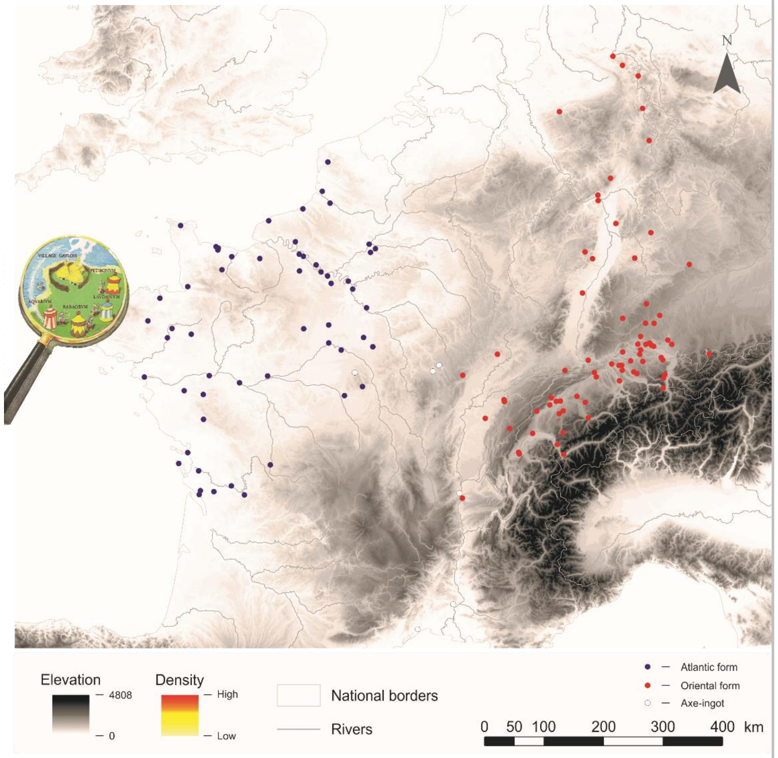
Checking the current typology of flanged axes

Specific types (Neyruz, Salez, Möhlin, …)

Atlantic vs Oriental type, „Axes-ingots “

Geometric morphometry (EFA)





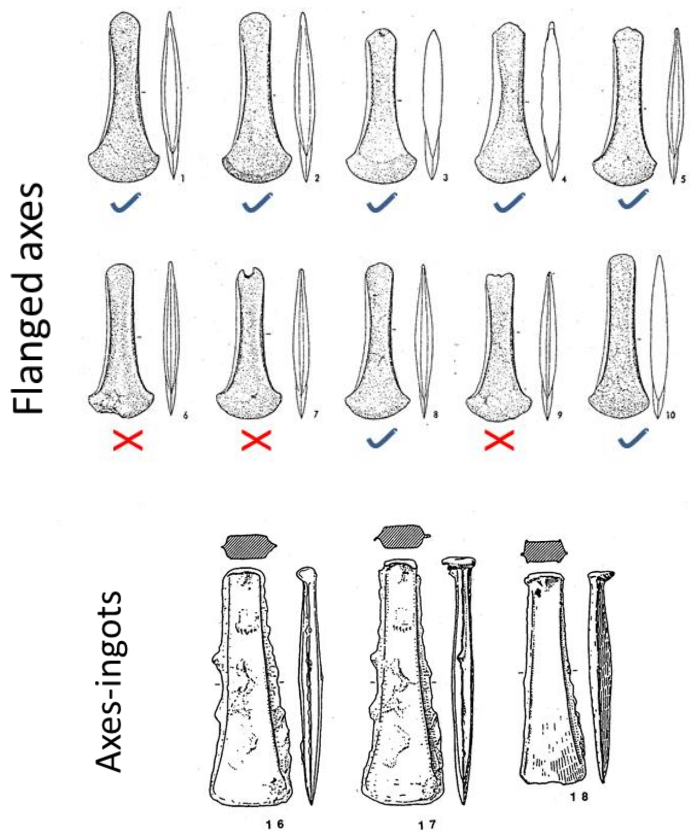
Wilczek et al., 2015

Case study on Flanged axes

Choice of corpus
- Entirely preserved
- Not much used
- A-priori classified (Atlantic/Oriental type)
- Axe-ingots

Studied corpus
- 286 axes from 132 sites
- 121 oriental forms
- 126 occidental forms
- 21 axes-ingots

Axes-ingots
- Similar to flanged axes
- Residual parts on borders



Wilczek et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Case study on Flanged axes

Morphometrics

EFA

$$x(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{k} a_j \cos\left(\frac{2j\pi t}{T}\right) + \sum_{j=1}^{k} b_j \sin\left(\frac{2j\pi t}{T}\right)$$

$$y(t) = c_0 + \sum_{j=1}^{k} a_j \cos\left(\frac{2j\pi t}{T}\right) + \sum_{j=1}^{k} d_j \sin\left(\frac{2j\pi t}{T}\right)$$

Wilczek et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

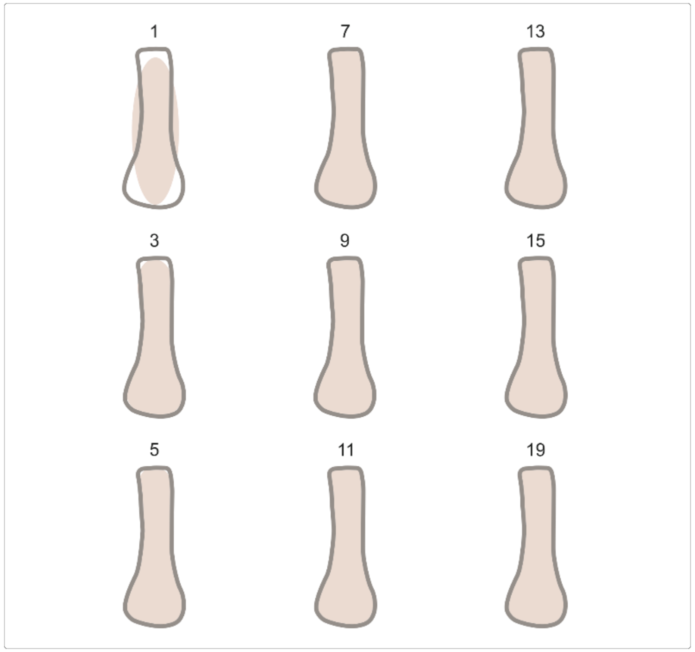
Case study on Flanged axes

Determination of harmonic number

Visualisation of inverse Fourier transformation

7 harmonics were enough, but 11 kept for analyses

Q: How many coefficients?



Wilczek et al., 2015

Case study on Flanged axes

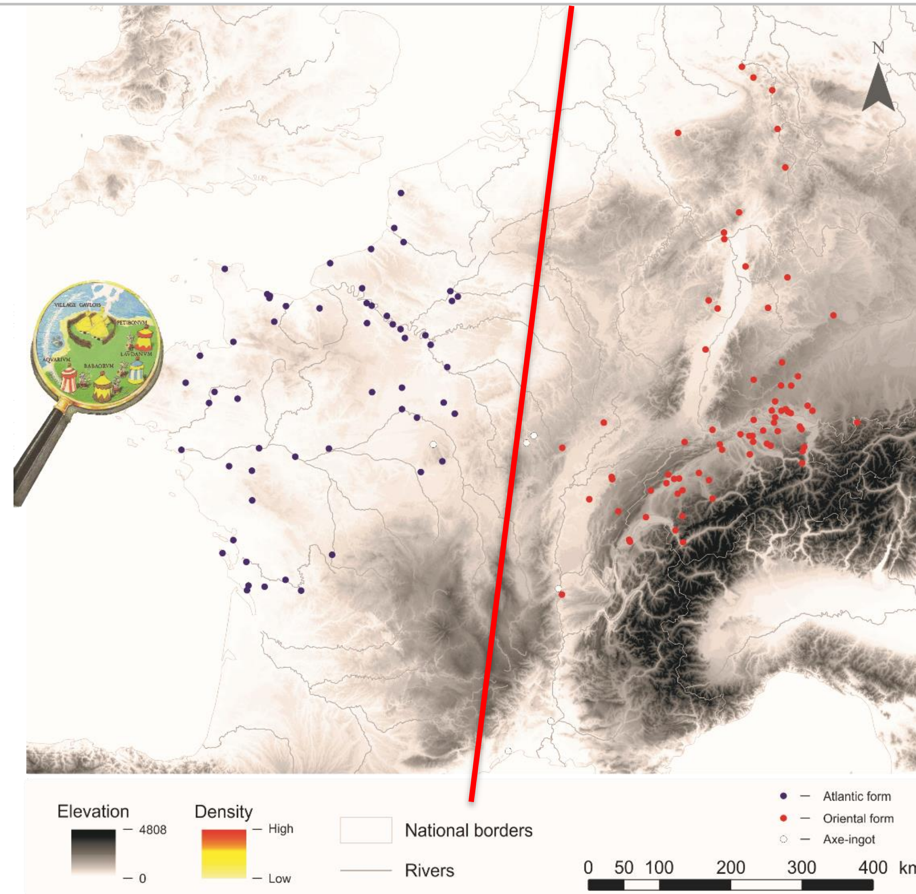
Checking the current typology (Oriental vs Atlantic group)

Principal Component Analysis (PCA)

Self Organising Maps (SOM)

Multidimensional Analysis of Variance (MANOVA)

Linear Discriminant Analysis (LDA)



Wilczek et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Case study on Flanged axes

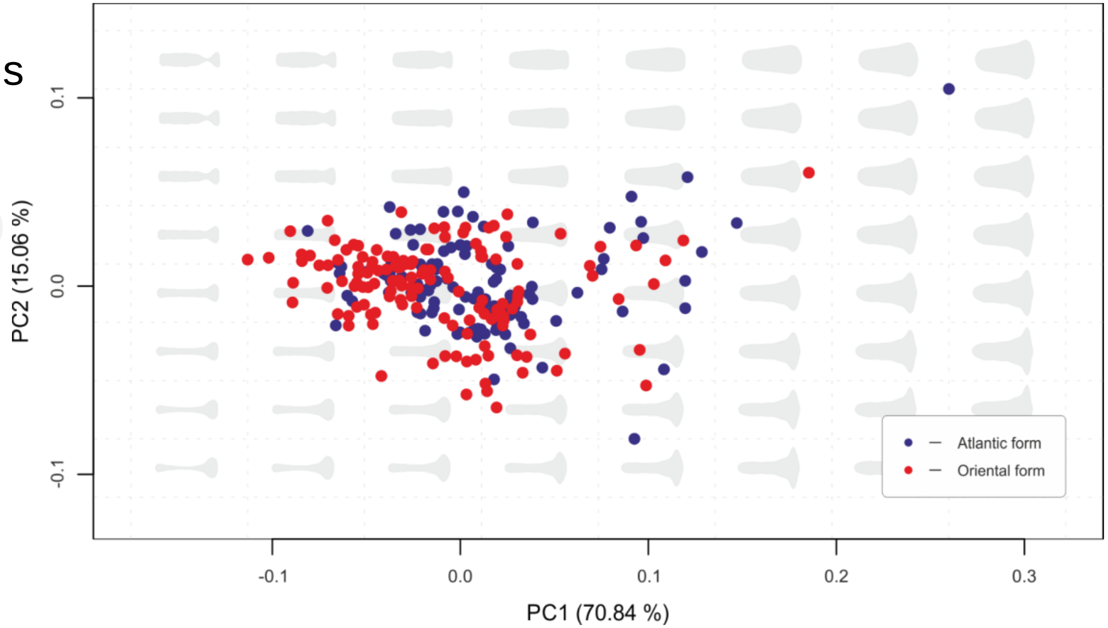
Checking the current typology (Oriental vs Atlantic group)

Principal Component Analysis (PCA)

Self Organising Maps (SOM)

Multidimensional Analysis of Variance (MANOVA)

Linear Discriminant Analysis (LDA)



Wilczek et al., 2015

Case study on Flanged axes

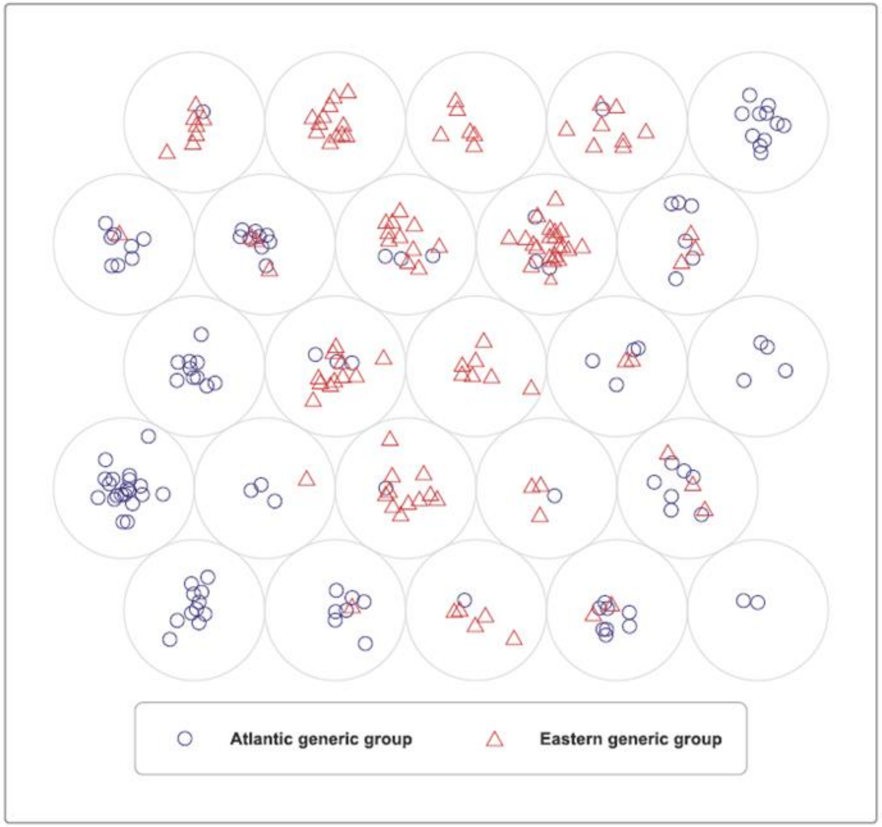
Checking the current typology (Oriental vs Atlantic group)

Principal Component Analysis (PCA)

Self Organising Maps (SOM)

Multidimensional Analysis of Variance (MANOVA)

Linear Discriminant Analysis (LDA)



Wilczek et al., 2015

FF UHK

Case study on Flanged axes

Checking the current typology (Oriental vs Atlantic group)

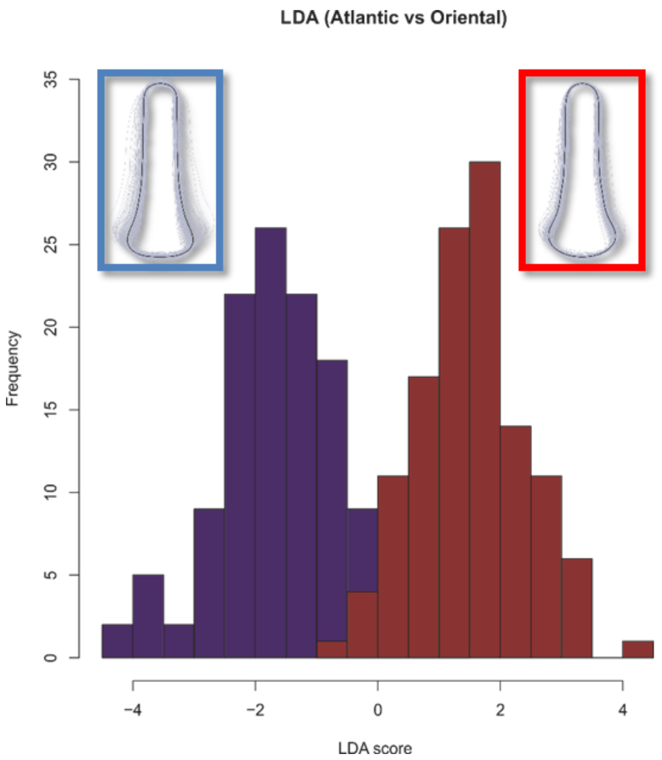
Principal Component Analysis (PCA)

Self Organising Maps (SOM)

Multidimensional Analysis of Variance (MANOVA)

Linear Discriminant Analysis (LDA)

```
           Df Hotelling-Lawley approx F num Df den Df    Pr(>F)
GR2.groups  1           2.3211   11.605     41    205 < 2.2e-16 ***
Residuals 245
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```



85% success (leave-one-out)
88% success (cross-validation)

Wilczek et al., 2015

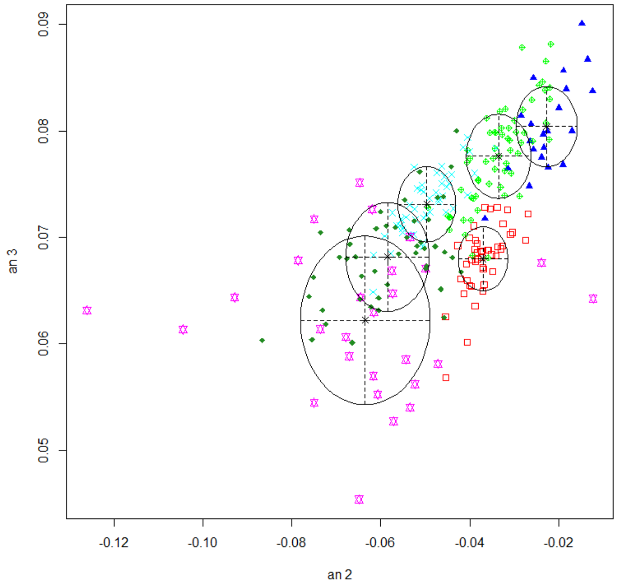
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

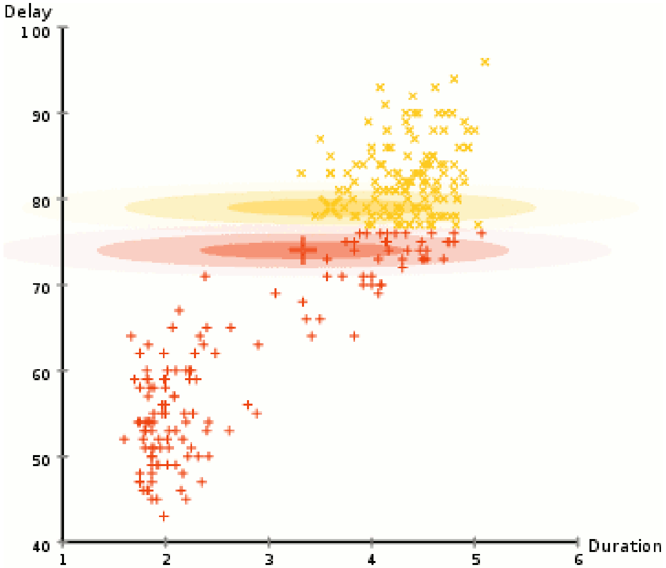
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Case study on Flanged axes

Making new classification

Gaussian Mixture Model clustering (GMM)





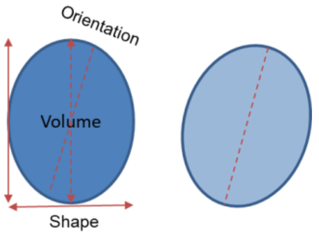
Wilczek et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

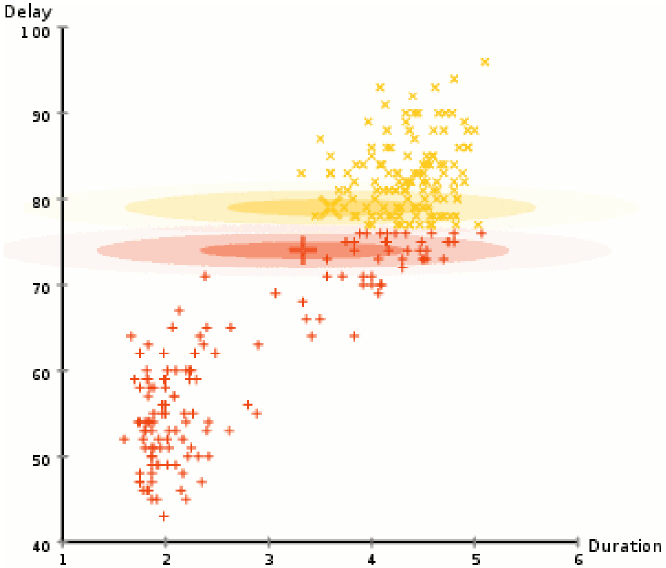
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Case study on Flanged axes

Gaussian Mixture Model clustering (GMM)



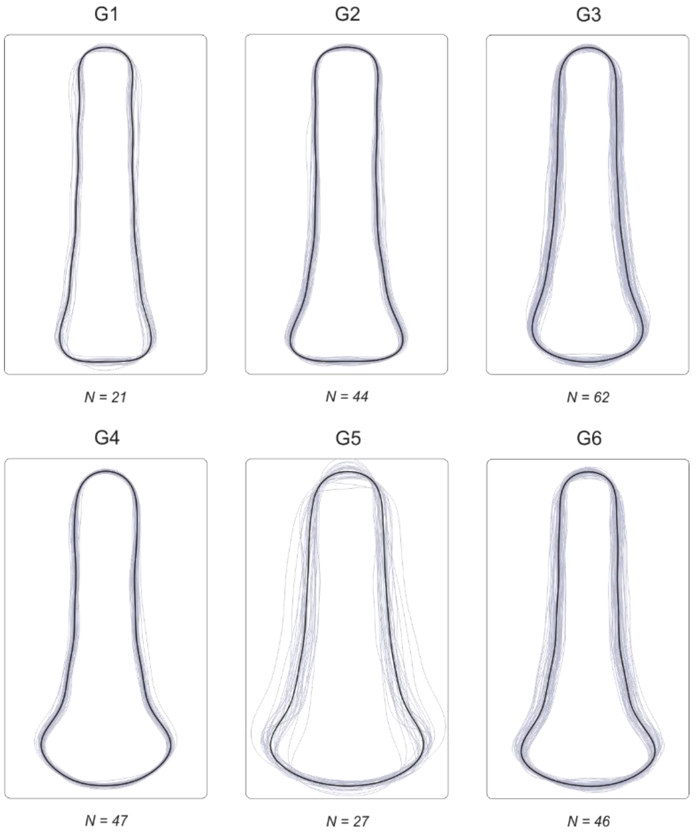
Model	Volume	Shape	Orientation
EII	equality	identity	identity
VII	variability	identity	identity
EEI	equality	equality	identity
VEI	**variability**	**equality**	**identity**
EVI	equality	variability	identity
VVI	variability	variability	identity
EEE	equality	equality	equality
EEV	equality	equality	variability
VEV	variability	equality	variability
VVV	variability	variability	variability



Case study on Flanged axes

Checking new classification

- Visual observation
- Self Organising Maps (SOM)
- Linear Discriminant Analysis (LDA)
- Kernel density
- Multinomial Scan Statistic (SatScan)



Wilczek et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Case study on Flanged axes

Checking new classification

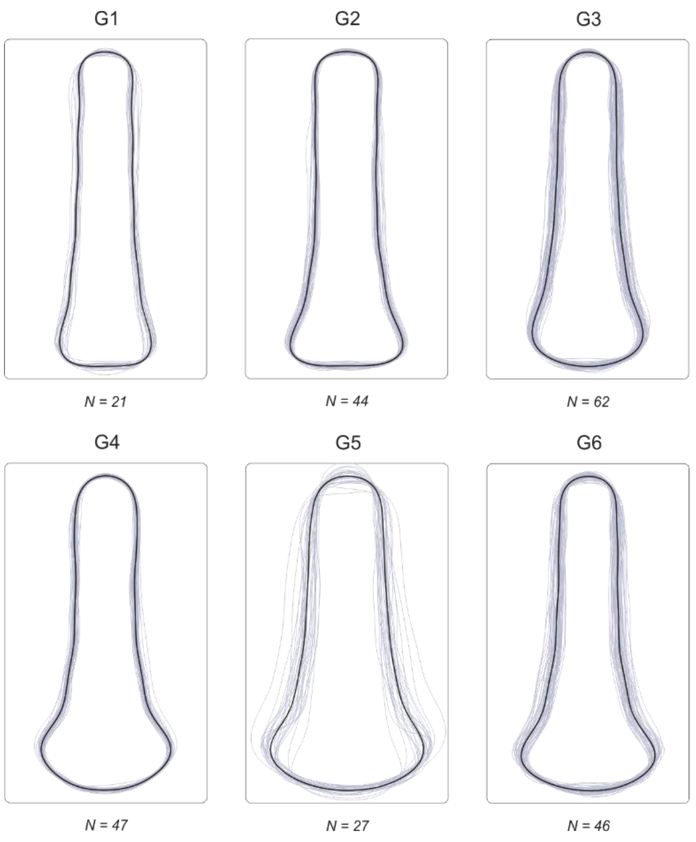
Visual observation

Self Organising Maps (SOM)

Linear Discriminant Analysis (LDA)

Kernel density

Multinomial Scan Statistic (SatScan)



Wilczek et al., 2015

FF UHK

Case study on Flanged axes

Checking new classification

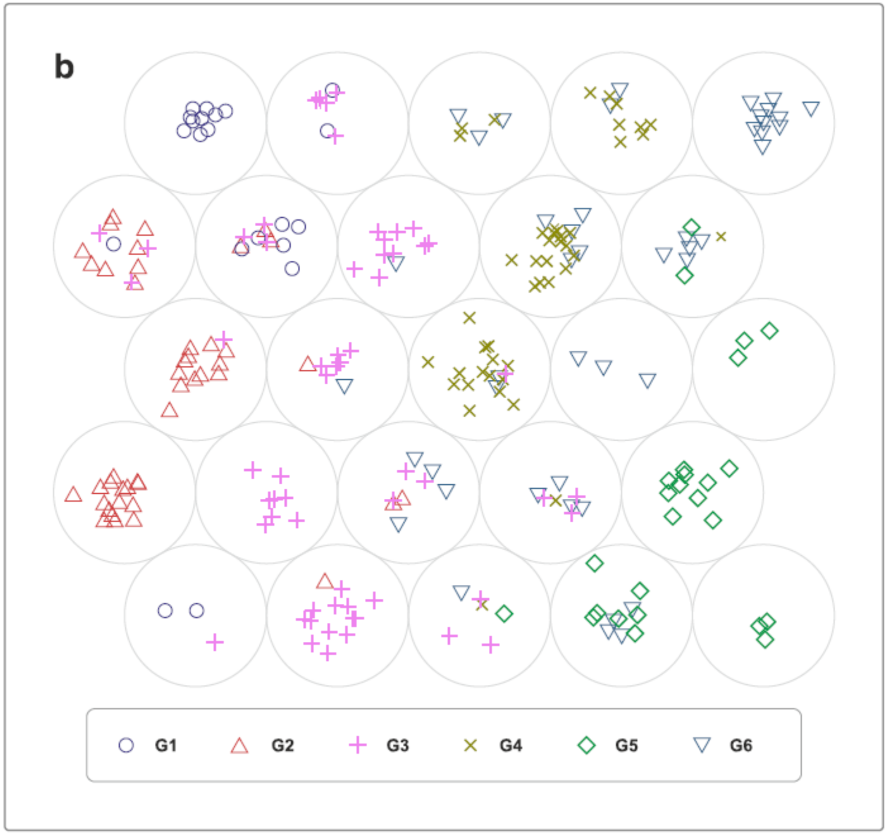
Visual observation

Self Organising Maps (SOM)

Linear Discriminant Analysis (LDA)

Kernel density

Multinomial Scan Statistic (SatScan)



Wilczek et al., 2015

Checking new classification

Visual observation

Self Organising Maps (SOM)

Linear Discriminant Analysis (LDA)

Kernel density

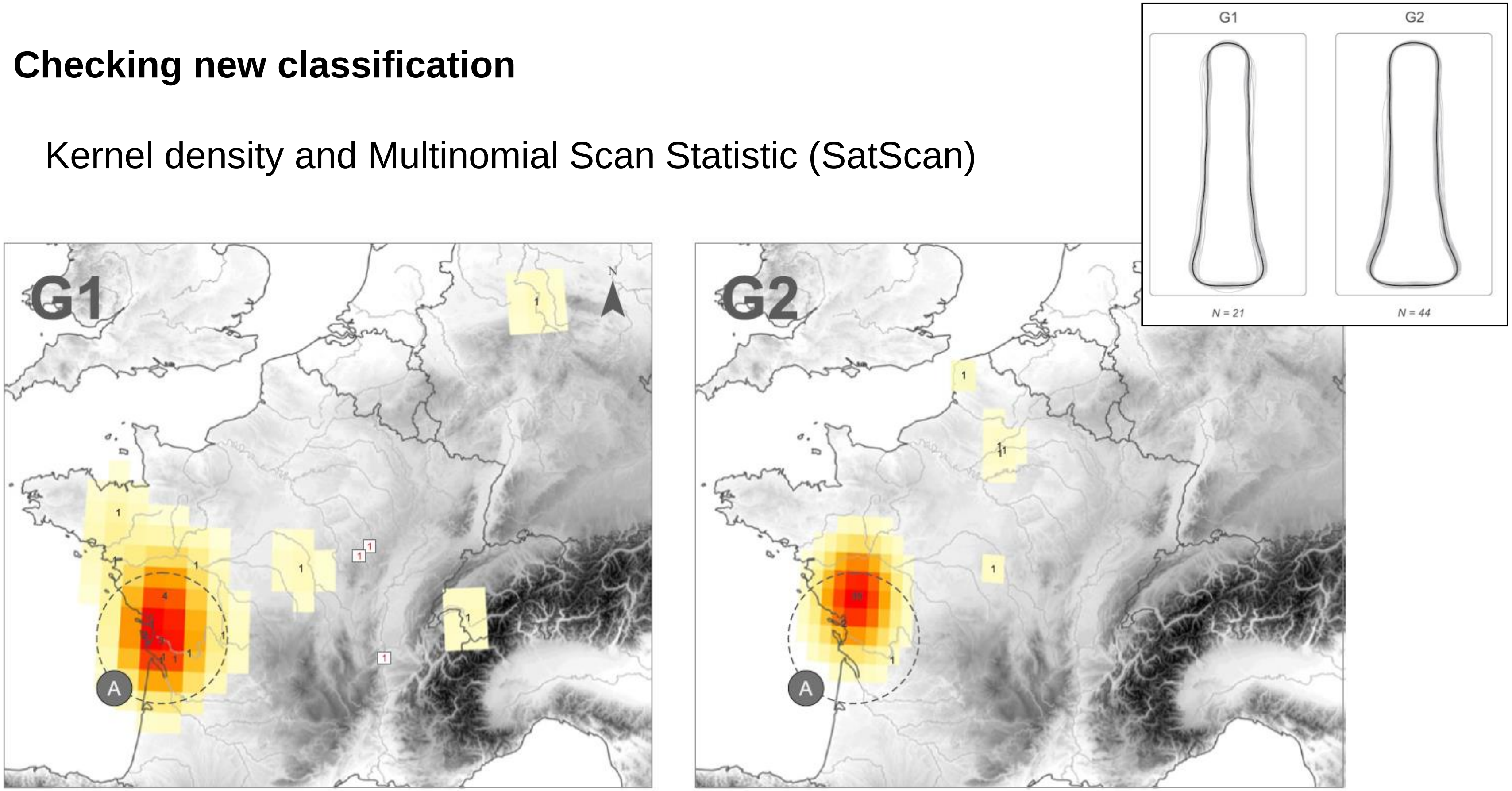
Multinomial Scan Statistic (SatScan)

none of the specimens was erroneously classified

Case study on Flanged axes

Checking new classification

Kernel density and Multinomial Scan Statistic (SatScan)



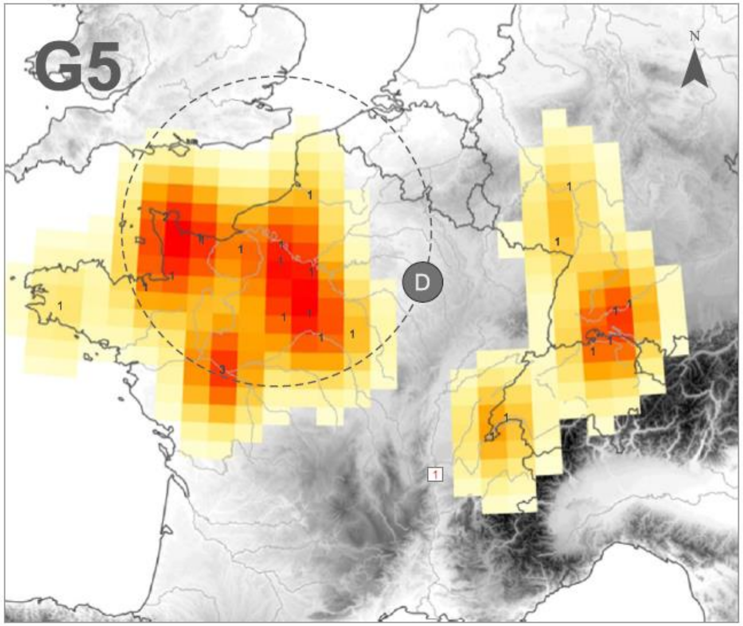
Wilczek et al., 2015

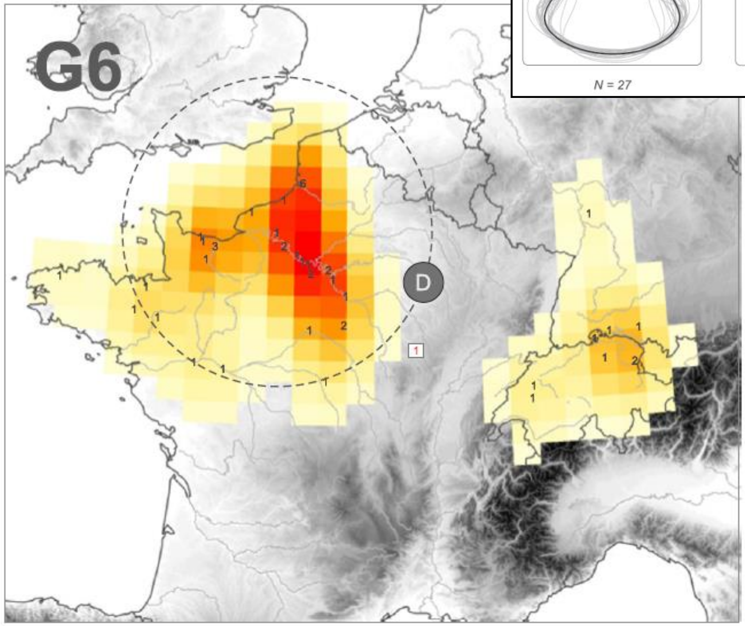
FF UHK

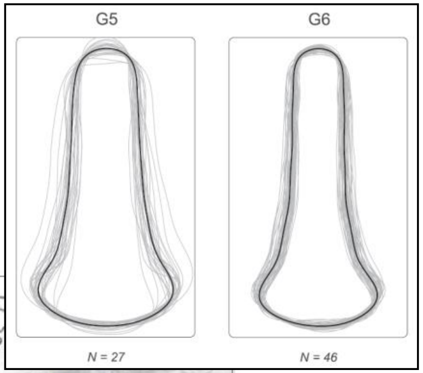
Case study on Flanged axes

Checking new classification

Kernel density and Multinomial Scan Statistic (SatScan)





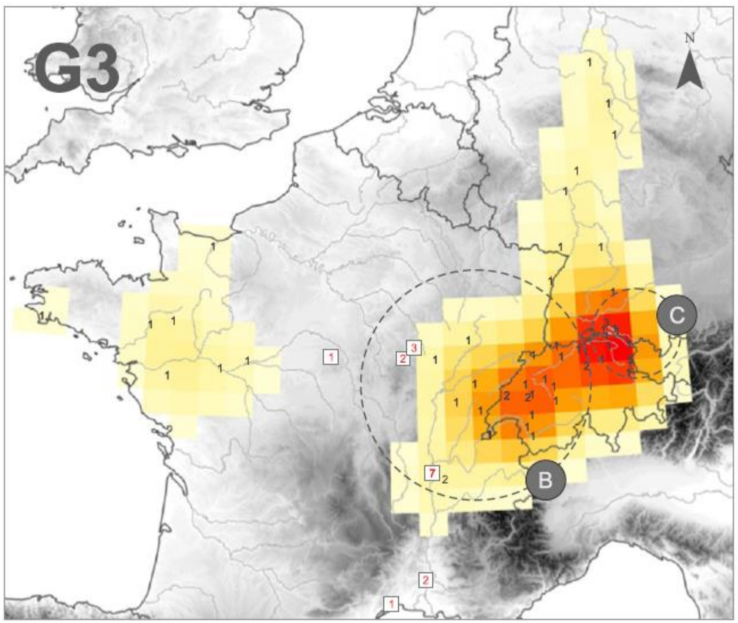


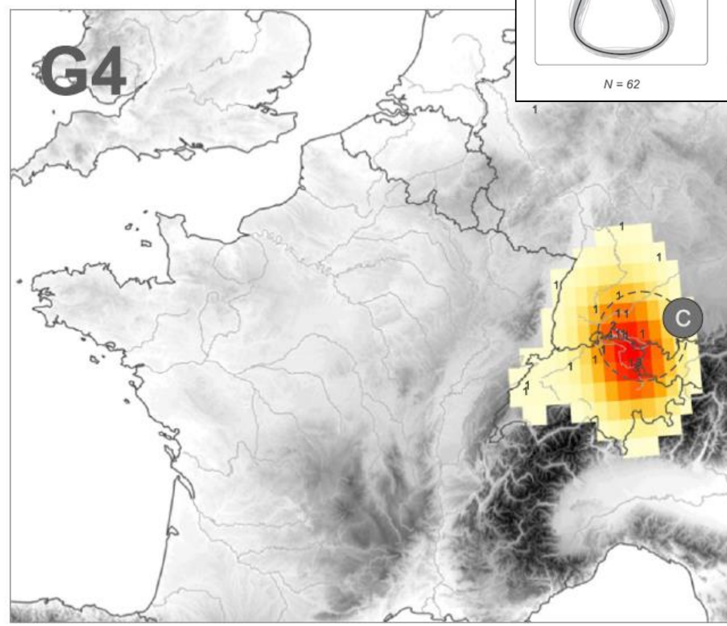
Wilczek et al., 2015

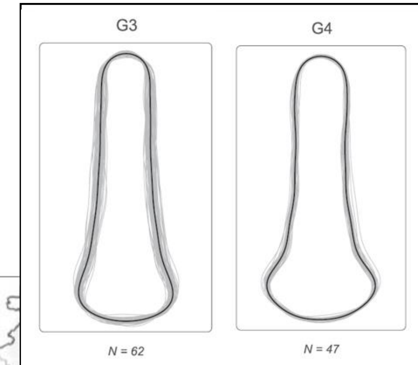
Case study on Flanged axes

Checking new classification

Kernel density and Multinomial Scan Statistic (SatScan)







Wilczek et al., 2015

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

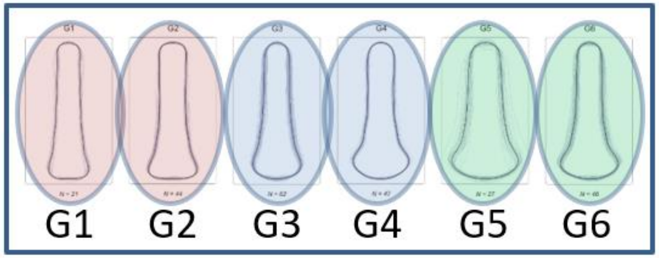
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

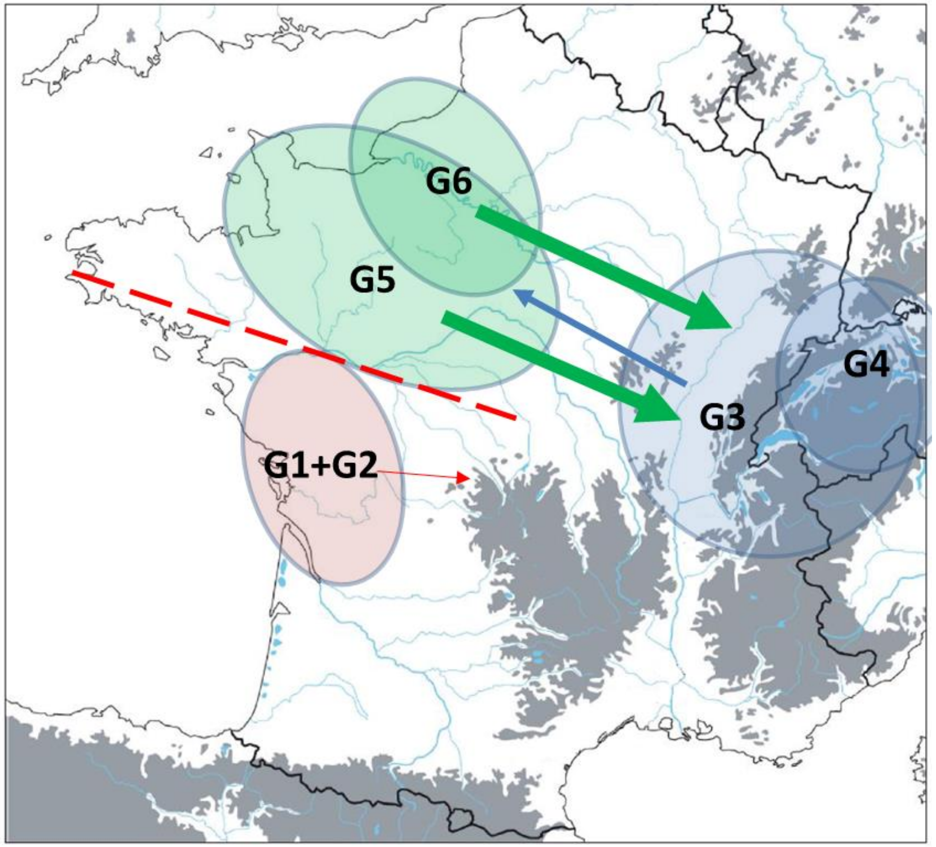
Case study on Flanged axes

Interpretations…

Exchanges:
west <=> east yes
south <=> north no

Economic/cultural "blockade"





EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

References:

- Forel, B., 2009. La métallurgie des alliages à base de cuivre en Bourgogne et en France orientale à l’âge du Bronze. Approche paléoenvironnementale et étude du mobilier métallique. Université de Bourgogne, Dijon.
- Karasik, A., Smilansky, U., 2011. Computerized morphological classification of ceramics. J. Archaeol. Sci. 38, 2644–2657.
- Králík, M., Urbanová, P., Hyršovská, J., 2008. Hodnocení stop na stavební keramice ze středověké cihelny v Sezimově Ústí, in: Krajíc, R. (Ed.), Středověké Cihlářství. Sezimovo Ústí Archeologie Středověkého Poddanského Města. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích & Husitské muzeum v Táboře, České Budějovice & Tábor, pp. 207–276.
- Lestrel, P.E., 1989. Method for Analyzing Complex Two-Dimensional Forms: Elliptical Fourier Functions. Am. J. Hum. Biol. 1, 149–164.
- MacLeod, N., 1999. Generalizing and extending the eigenshape method of shape space visualization and analysis. Paleobiology 25, 107–138.
- Monna, F., Jebrane, A., Gabillot, M., Laffont, R., Specht, M., Bohard, B., Camizuli, E., Petit, C., Chateau, C., Alibert, P., 2013. Morphometry of Middle Bronze Age palstaves. Part II - spatial distribution of shapes in two typological groups, implications for production and exportation. J. Archaeol. Sci. 40, 507–516.
- Saragusti, I., Karasik, A., Sharon, I., Smilansky, U., 2005. Quantitative analysis of shape attributes based on contours and section profiles in artifact analysis. J. Archaeol. Sci. 32, 841–853.
- Urbanová, P., 2009. A Study of Human Craniofacial Variation by Using Geometric Morphometrics. Masaryk university, Brno.
- Wilczek, J., 2017. New approaches for the acquisition, systematisation and interpretation of archaeological artefacts. Masarykova univerzita & Université Bourgogne - Franche-Comté, Brno & Dijon.
- Wilczek, J., Monna, F., Gabillot, M., Navarro, N., Rusch, L., Chateau, C., 2015. Unsupervised model-based clustering for typological classification of Middle Bronze Age flanged axes. J. Archaeol. Sci. - Rep. 3, 381–391.

- https://jwilczek.com/teaching/m2-ages-morphometrie/
- http://www.anarchiel.com
- http://www.biology-online.org
- http://www.fabricemonna.com/enseignement-2/master-ages/morphometrie-m2-ages/
- http://www.wikipedia.com

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY