Genetic Variation in Horse Breeds Derived from Whole Genome SNP Data

Jessica Petersen, Jim Mickelson, Molly McCue
University of Minnesota, USA
and the Equine Genetic Diversity Consortium

Genetic Diversity in the Modern Horse

- Some breeds are many hundreds of years old while others have been developed relatively recently.
- Some breed registries allow outcrossing and admixture.
- Some breeds are defined by phenotype alone.
- Some populations are classified by their region of origin without active maintenance of a registry.
- Some breeds have experienced severe population bottlenecks.

Previous Studies on Genetic Diversity in the Horse

- Previous studies have examined mitochondrial DNA variation and nuclear DNA (microsatellite) variation.
- Typically a single population, sets of historically related breeds, or breeds from specific geographic regions are examined.
- We have used the Illumina 54,000 SNP genotype data to calculate measures of inter-breed and intra-breed diversity.

Equine Genetic Diversity Consortium

Lisa Andersson, Jeanette Axelsson, Gabriella Lindgren, Sofia Mikko
Ernie Bailey, Kathryn Graves
Danika Bannasch, Cecilia Penedo
Matthew Binns
Alexandre Borges
Katia Cappelli, Stefano Capomaccio, Michela Felicetti, Maurizio Silvestrelli
E Gus Cothran
Artur da Câmara Machado, Maria Susana Lopes
Ottmar Distl
Gérard Guérin
Telhisa Hasegawa
Bianca Haase, Claire Wade
Tosso Leeb, Stefan Rieder
Hannes Lohi, Marja Raekallio, Karin Hemmann
Emmeline W Hill, Nicholas Orr, Pieter Brama, Beatrice McGivney
Richard Piercy
Knut Røed
Oliver Ryder
June Swinburne, Mark Vaudin
Teruaki Tozaki

Norges veterinærhøgskole
unesp
UNIVERSITÄT BERN
JRA
RVC Royal Veterinary College University of London
TIERÄRZTLICHE HOCHSCHULE HANNOVER · STIFTUNG ·
SLU Swedish University of Agricultural Sciences
UCD DUBLIN
AHT Animal Health Trust
TEXAS A&M UNIVERSITY COLLEGE OF VETERINARY MEDICINE & BIOMEDICAL SCIENCES
SAN DIEGO ZOO Institute for Conservation Research™
UNIVERSITY OF HELSINKI
STUDIUM GENERALE CIVITATIS PERUSII A.D. MCCCVIII
The University of Sydney
Equine Analysis
UCDAVIS UNIVERSITY OF CALIFORNIA
UNIVERSIDADE DOS AÇORES
INRA
UNIVERSITY OF KENTUCKY GLUCK EQUINE RESEARCH FOUNDATION

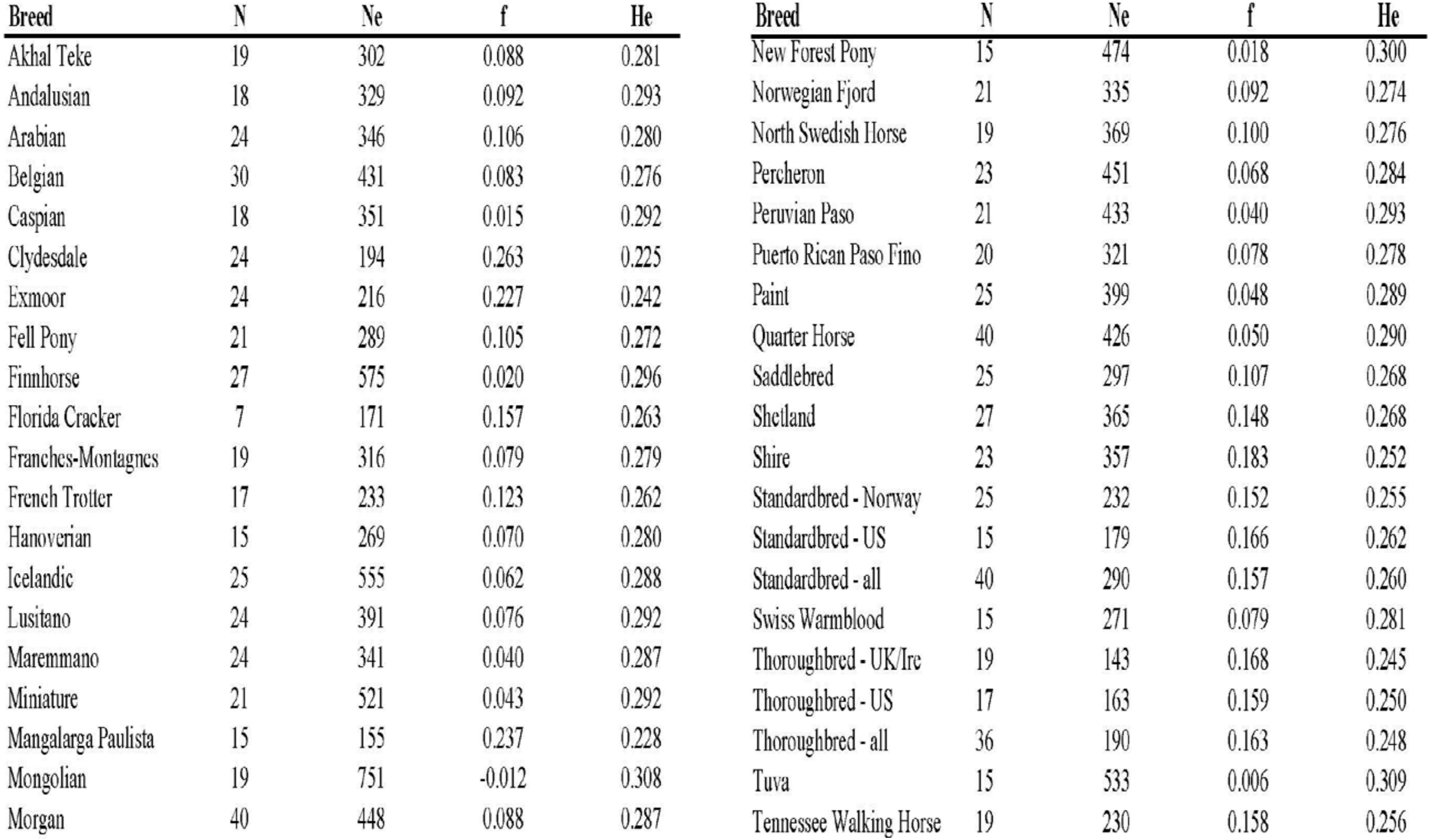
744 Horses from 33 Breeds

Breed	N
Akhal Teke	19
Andalusian	18
Arabian	24
Belgian	30
Caspian Pony	18
Clydesdale	24
Exmoor	24
Fell Pony	21
Finnhorse	27
Franches-Montagnes	19
French Trotter	17
Hanoverian	15
Icelandic	25
Mangalarga Paulista	15
Miniature	21
Mongolian	19
Morgan	40
New Forest Pony	15
North Swedish Horse	19
Norwegian Fjord	21
Paint	25
Percheron	23
Peruvian Paso	21
Puerto Rican Paso Fino	20
Quarter Horse	40
Saddlebred	25
Shetland	27
Shire	23
Standardbred	25
Swiss Warmblood	14
Tennessee Walking Horse	19
Thoroughbred - United Kingdom	19
Thoroughbred - United States	17
Tuva	15

Analysis

- An average of 22.5 horses/breed were included.
- Removed SNPs with MAF < 0.05, as well as ECAX SNPs.
- Removed SNPs that were in LD ($r^2 < 0.1$).
- Resulted in 6,028 SNPs for most analyses.
- On a case by case basis, individuals were removed from the analyses to reduce genome sharing as measured by pi hat values to less than 0.3.

Effective population size (N_e), individual inbreeding estimates (f), inbreeding coefficient (F_{IS}), and expected heterozygosity (H_e)



Breed	N	Ne	f	He
Akhal Teke	19	302	0.088	0.281
Andalusian	18	329	0.092	0.293
Arabian	24	346	0.106	0.280
Belgian	30	431	0.083	0.276
Caspian	18	351	0.015	0.292
Clydesdale	24	194	0.263	0.225
Exmoor	24	216	0.227	0.242
Fell Pony	21	289	0.105	0.272
Finnhorse	27	575	0.020	0.296
Florida Cracker	7	171	0.157	0.263
Franches-Montagnes	19	316	0.079	0.279
French Trotter	17	233	0.123	0.262
Hanoverian	15	269	0.070	0.280
Icelandic	25	555	0.062	0.288
Lusitano	24	391	0.076	0.292
Maremmano	24	341	0.040	0.287
Miniature	21	521	0.043	0.292
Mangalarga Paulista	15	155	0.237	0.228
Mongolian	19	751	-0.012	0.308
Morgan	40	448	0.088	0.287
New Forest Pony	15	474	0.018	0.300
Norwegian Fjord	21	335	0.092	0.274
North Swedish Horse	19	369	0.100	0.276
Percheron	23	451	0.068	0.284
Peruvian Paso	21	433	0.040	0.293
Puerto Rican Paso Fino	20	321	0.078	0.278
Paint	25	399	0.048	0.289
Quarter Horse	40	426	0.050	0.290
Saddlebred	25	297	0.107	0.268
Shetland	27	365	0.148	0.268
Shire	23	357	0.183	0.252
Standardbred - Norway	25	232	0.152	0.255
Standardbred - US	15	179	0.166	0.262
Standardbred - all	40	290	0.157	0.260
Swiss Warmblood	15	271	0.079	0.281
Thoroughbred - UK/Ire	19	143	0.168	0.245
Thoroughbred - US	17	163	0.159	0.250
Thoroughbred - all	36	190	0.163	0.248
Tuva	15	533	0.006	0.309
Tennessee Walking Horse	19	230	0.158	0.256

Within Breed Diversity (Ne)

- The mean effective population size (Ne) across breeds ranged from 190 to 743.
- The mean Ne in this sample collection was 341.
- Ne was lowest in the Thoroughbred (190) , but was also low in the Standardbreds and French Trotters, as well as the Clydesdale (194).
- The highest values of Ne were observed in the Mongolian (743) and Tuva (533), and also in the Icelandic (555), Finnhorse (575), and Miniature (521).

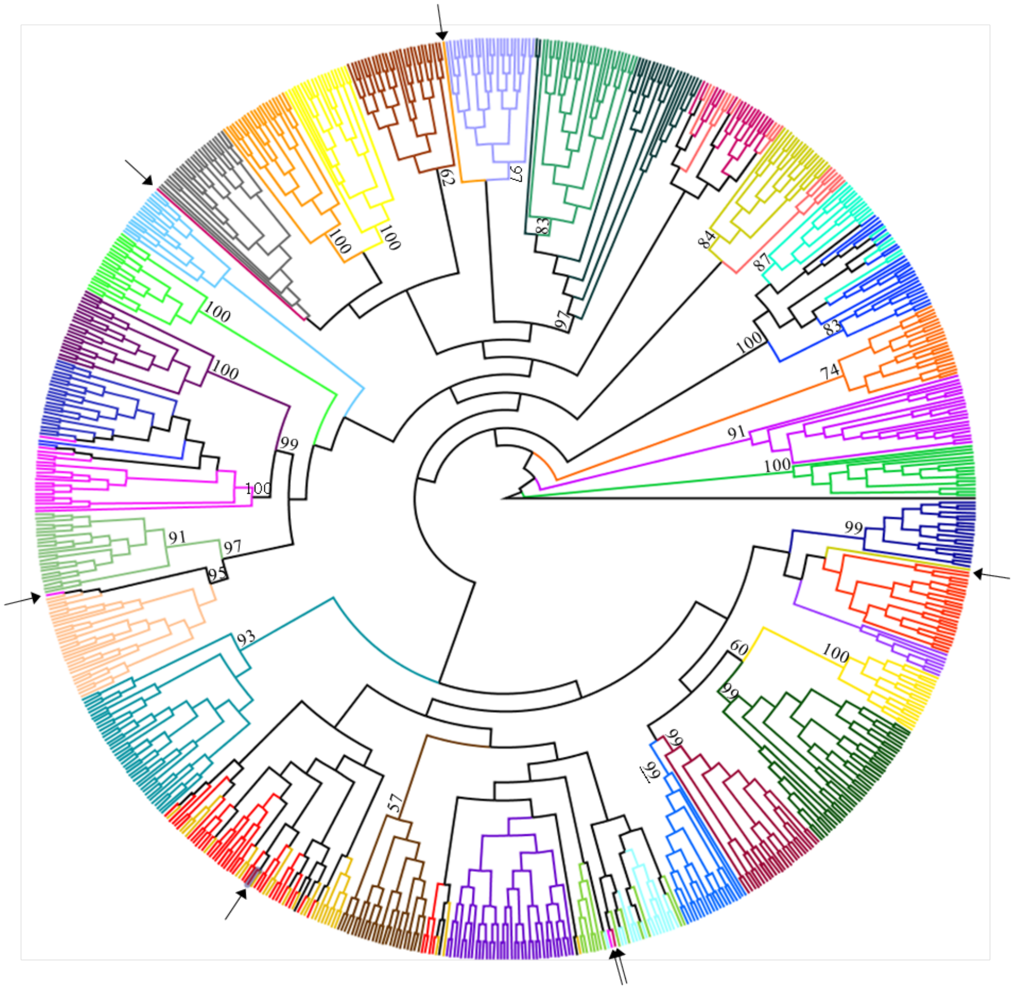
Within Breed Diversity (f)

- Inbreeding coefficients (f) were calculated for each individual based upon observed and expected heterozygosity.
- 17 individuals with estimated f > 0.3 included 4 Exmoor, 6 Clydesdale, 2 Mangalarga Paulista, and 1 Akhal Teke, Florida Cracker, Morgan, Shetland, and Tennessee Walking Horse.
- Consequently, average individual estimates of f were greatest in the Clydesdale, Mangalarga Paulista, and Exmoor while the lowest breed means were found in the less-actively managed populations, Warmbloods, Quarter Horse, as well as the Caspian.

Within Breed Diversity (H_e)

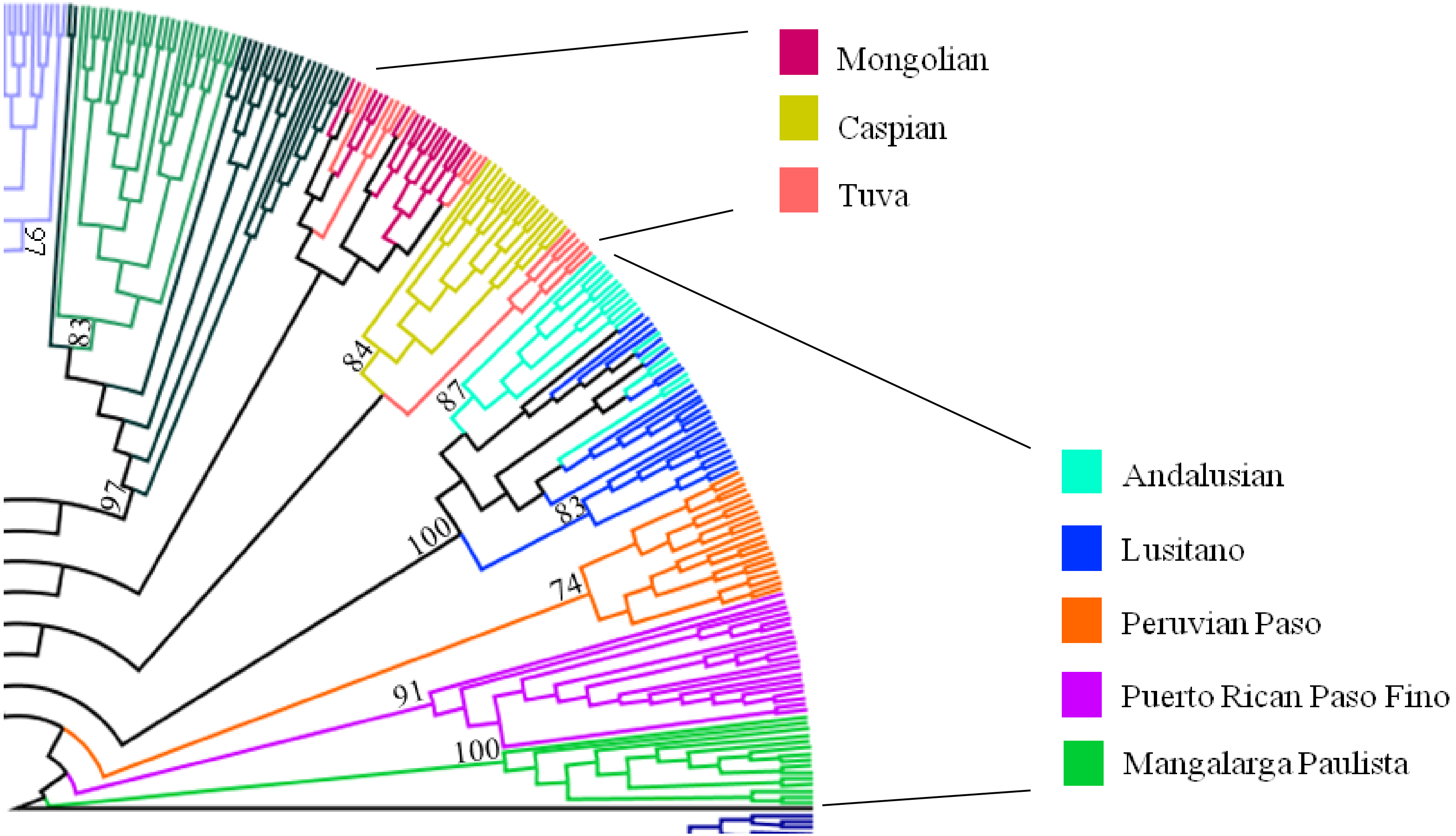
- Diversity as measured by expected heterozygosity (H_e) had a mean across breeds of 0.275.
- H_e ranged from 0.309 and 0.308 in the Mongolian and Tuva, respectively, to 0.225 in the Clydesdale.
- A relatively low H_e of 0.248 was found in the Thoroughbred and in the other racing breeds (Standardbreds and French Trotters).
- A relatively high H_e was present in breeds with continuing admixture and/or large population size (Warmbloods, Quarter Horse).

Parsimony Tree Rooted by the Domestic Ass

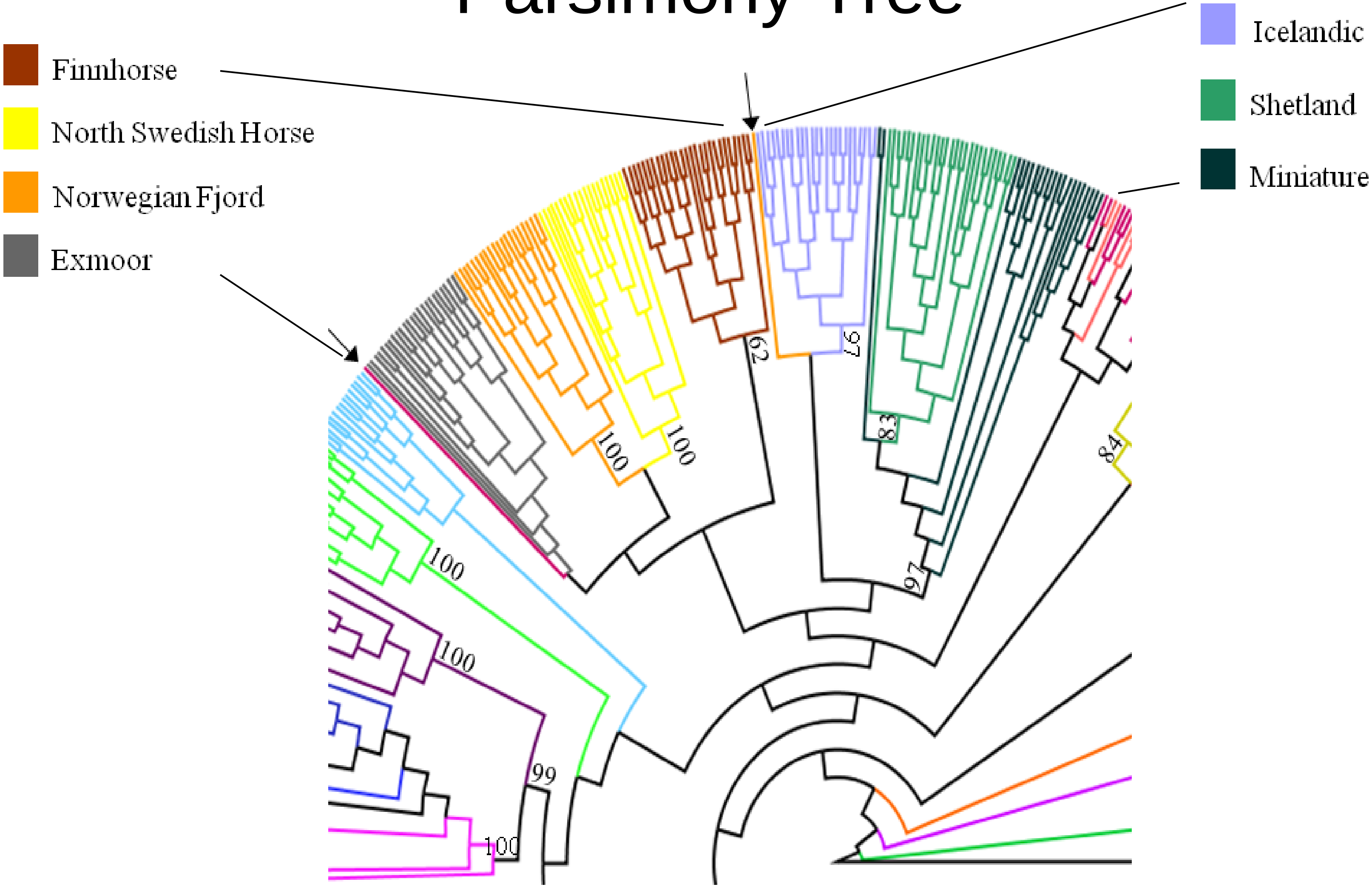


- ■ Mangalarga Paulista
- ■ Puerto Rican Paso Fino
- ■ Peruvian Paso
- ■ Lusitano
- ■ Andalusian
- ■ Caspian
- ■ Tuva
- ■ Mongolian
- ■ Miniature
- ■ Shetland
- ■ Icelandic
- ■ Finnhorse
- ■ North Swedish Horse
- ■ Norwegian Fjord
- ■ Exmoor
- ■ New Forest Pony
- ■ Franches-Montagnes
- ■ Fell Pony
- ■ Clydesdale
- ■ Shire
- ■ Percheron
- ■ Belgian
- ■ Morgan
- ■ Quarter Horse
- ■ Paint
- ■ Maremmano
- ■ Thoroughbred
- ■ Swiss Warmblood
- ■ Hanoverian
- ■ Tennessee Walking Horse
- ■ Saddlebred
- ■ Standardbred
- ■ French Trotter
- ■ Florida Cracker
- ■ Arabian
- ■ Akhal Teke

Parsimony Tree



Parsimony Tree



🟫 Finnhorse

🟨 North Swedish Horse

🟧 Norwegian Fjord

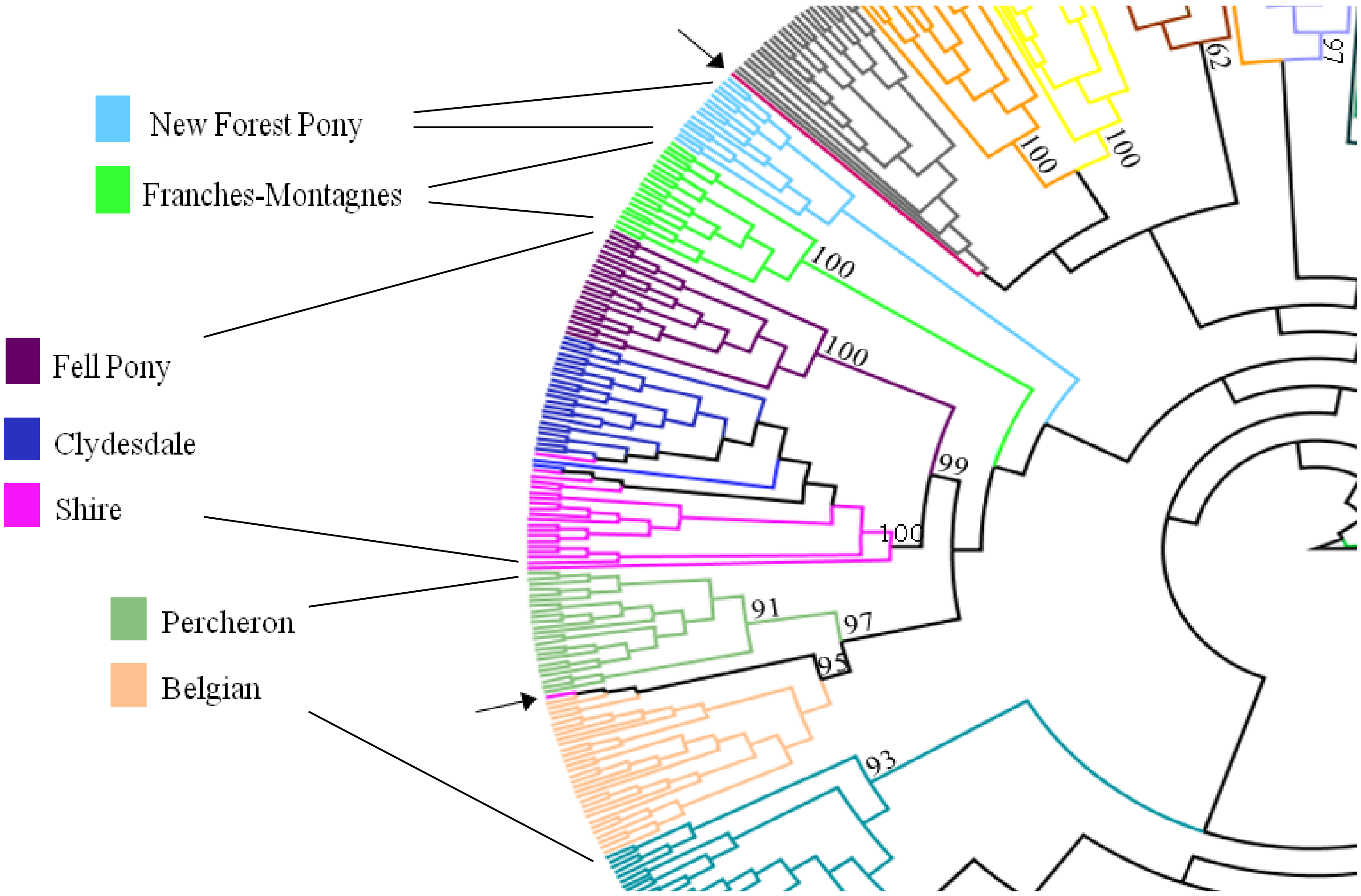
⬛ Exmoor

🟪 Icelandic

🟩 Shetland

⬛ Miniature

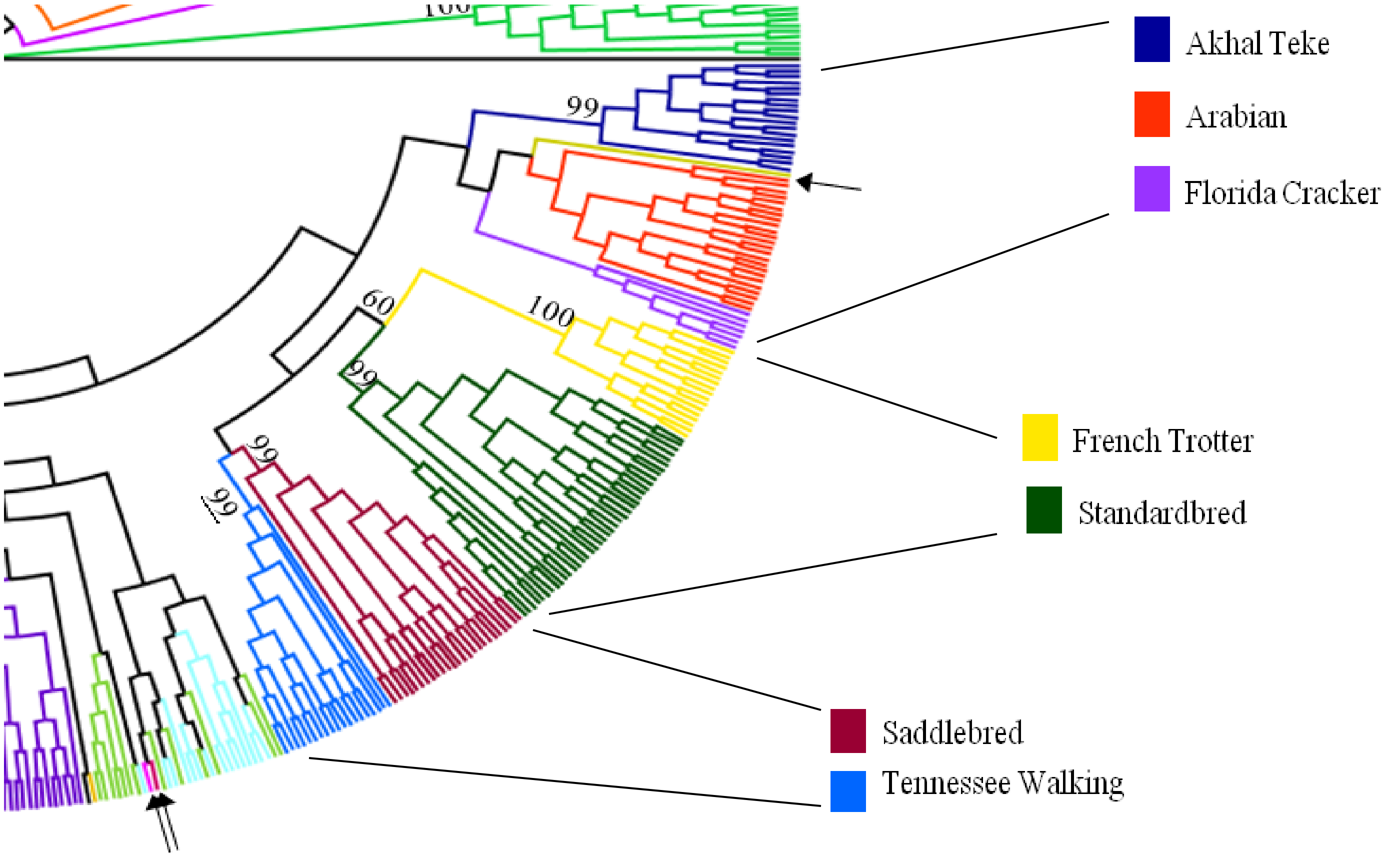
Parsimony Tree



- 🟦 New Forest Pony
- 🟩 Franches-Montagnes
- 🟪 Fell Pony
- 🟦 Clydesdale
- 🟪 Shire
- 🟩 Percheron
- 🟧 Belgian

Parsimony Tree

Parsimony Tree



Parsimony Summary

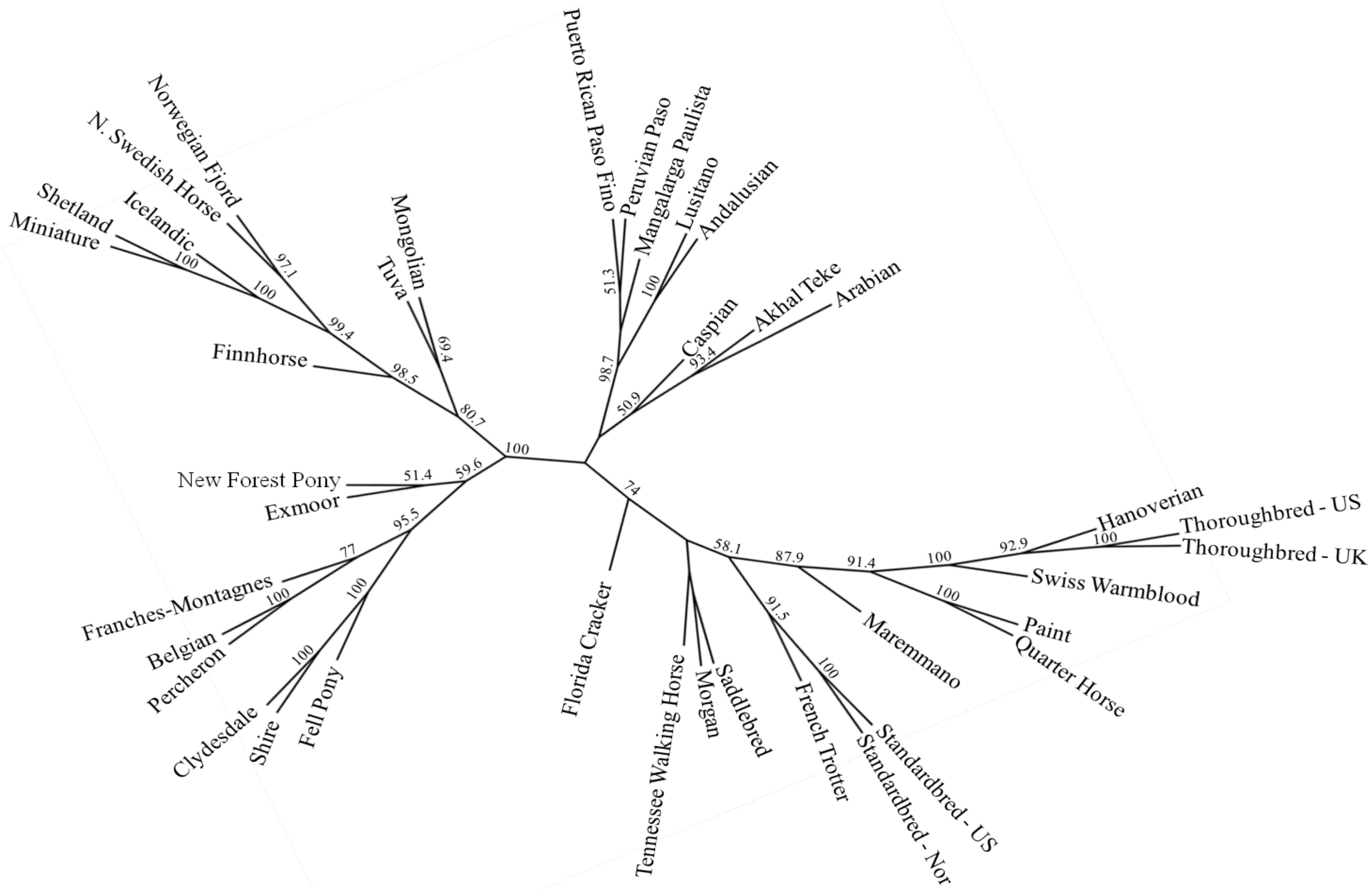
- There is generally tight clustering and monophyly of samples within breeds.
- Major clades of the tree include:
  - Iberian breeds
  - Scandinavian breeds
  - Ponies
  - Heavy draft breeds
  - TB and related admixed breeds
  - Modern US breeds
  - Trotting breeds
  - Middle Eastern breeds

Parsimony Summary

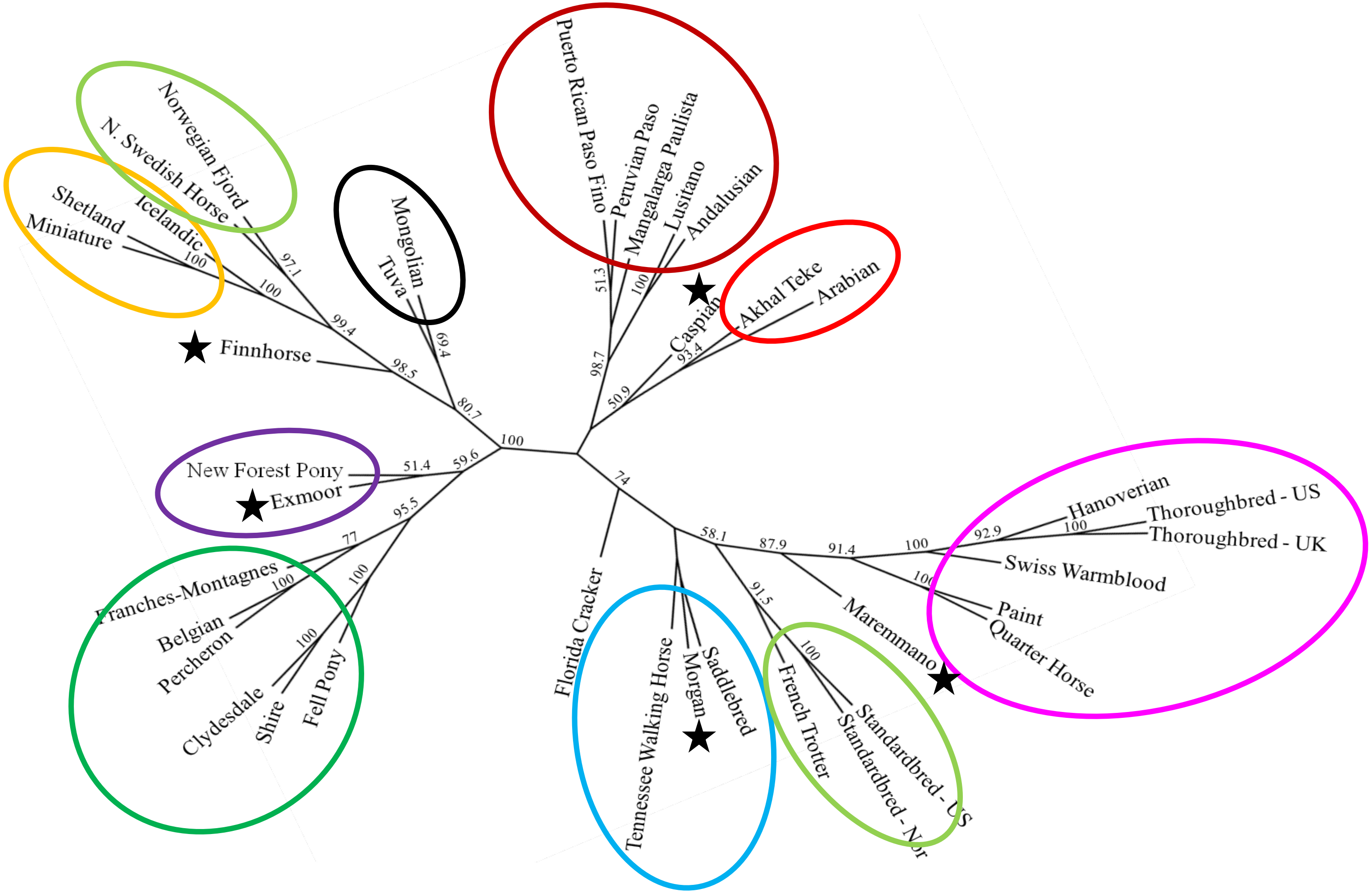
- Some clades are not monophyletic.
    - Paint and Quarter Horse
    - Hannoverian and Swiss Warmblood

- Some individuals are not in clades with most other representatives of their breed.

Unrooted Neighbor Joining Tree



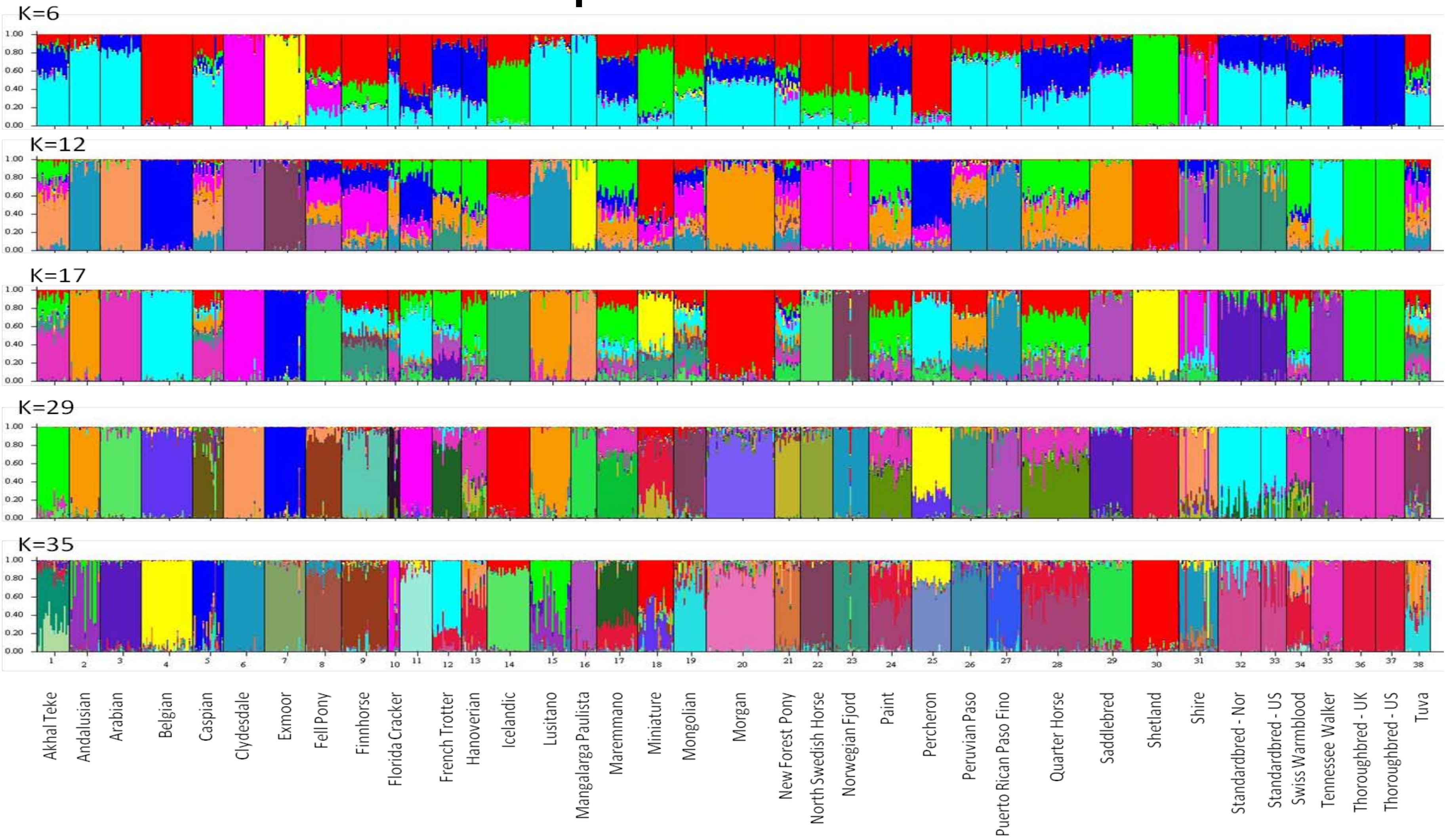
Distance Analysis



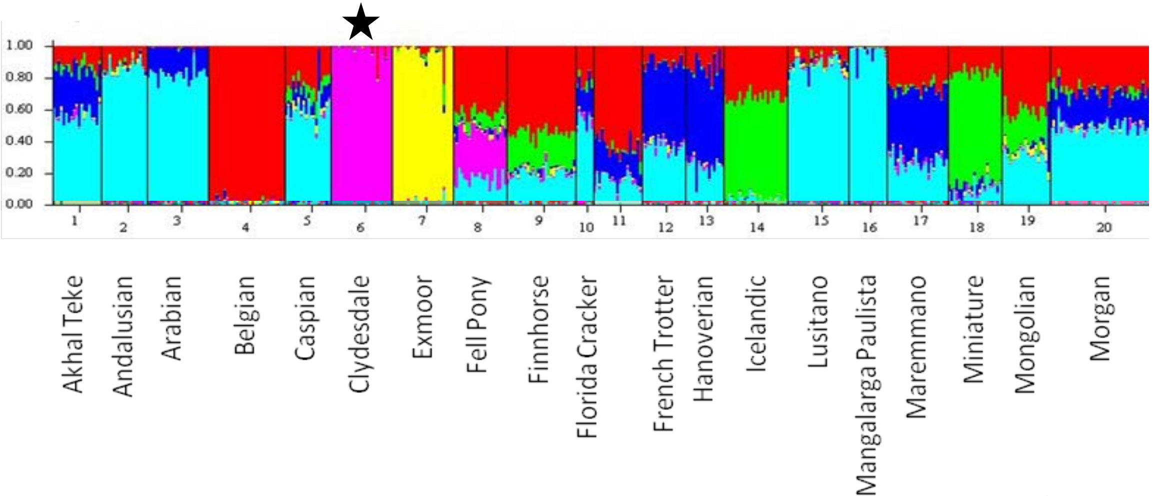
Distance Analysis Summary

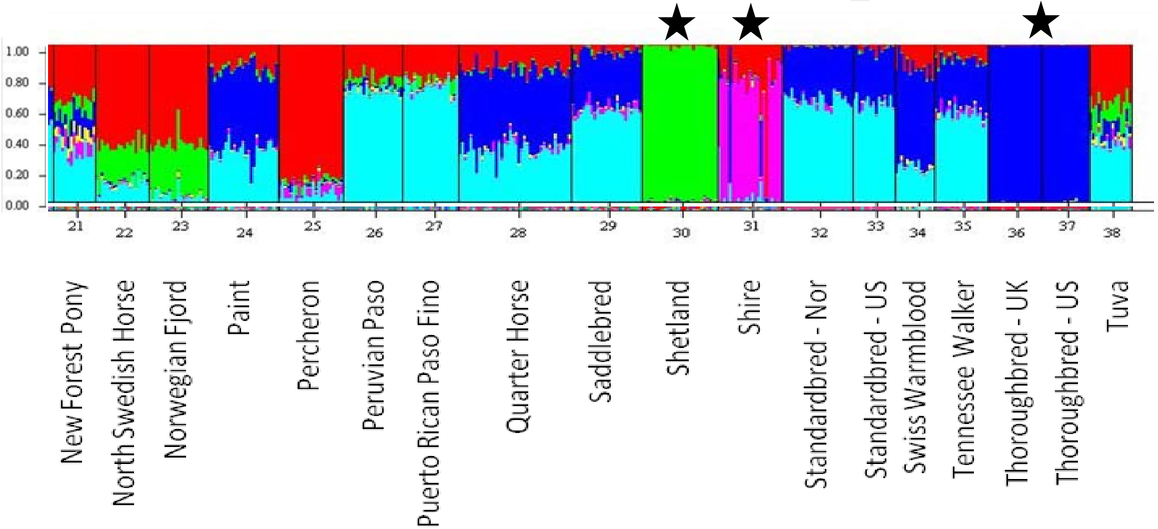
- There is quite good agreement with the parsimony analysis with a few differences.
  - Caspian is now with Middle Eastern breed.
  - Finnhorse is not with Scandinavian breeds.
  - Exmoor pony is now with New Forrest pony
  - Morgan is now with Saddlebred and Tennessee Walking Horse.
  - Marremmano is not as close to the TB group.
- Strong bootstrap support for all clades except the US breeds and the Paso, Paso Fino and Paulista.

Structure Output for Five Values of K

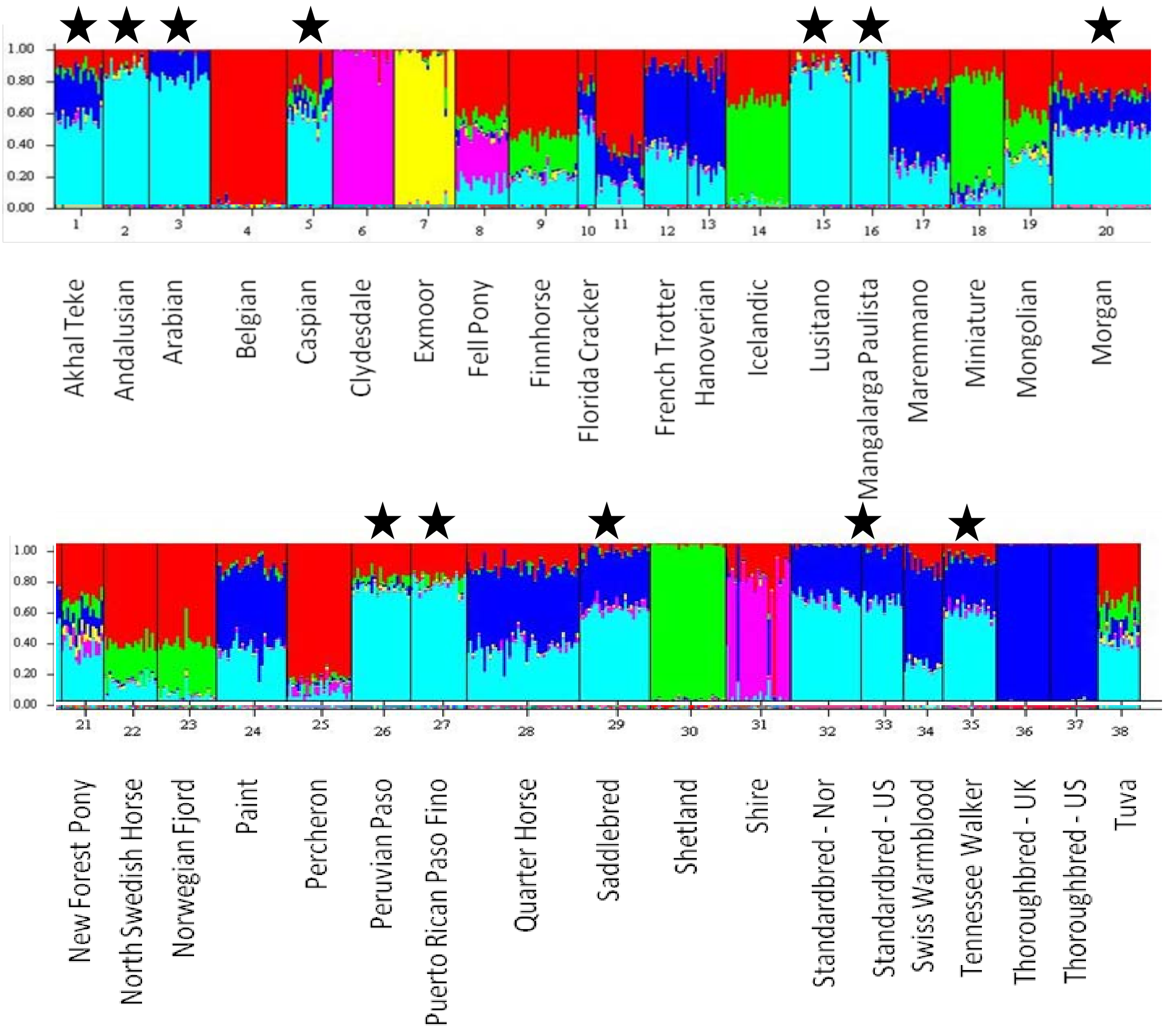


Structure for K ≤ 6

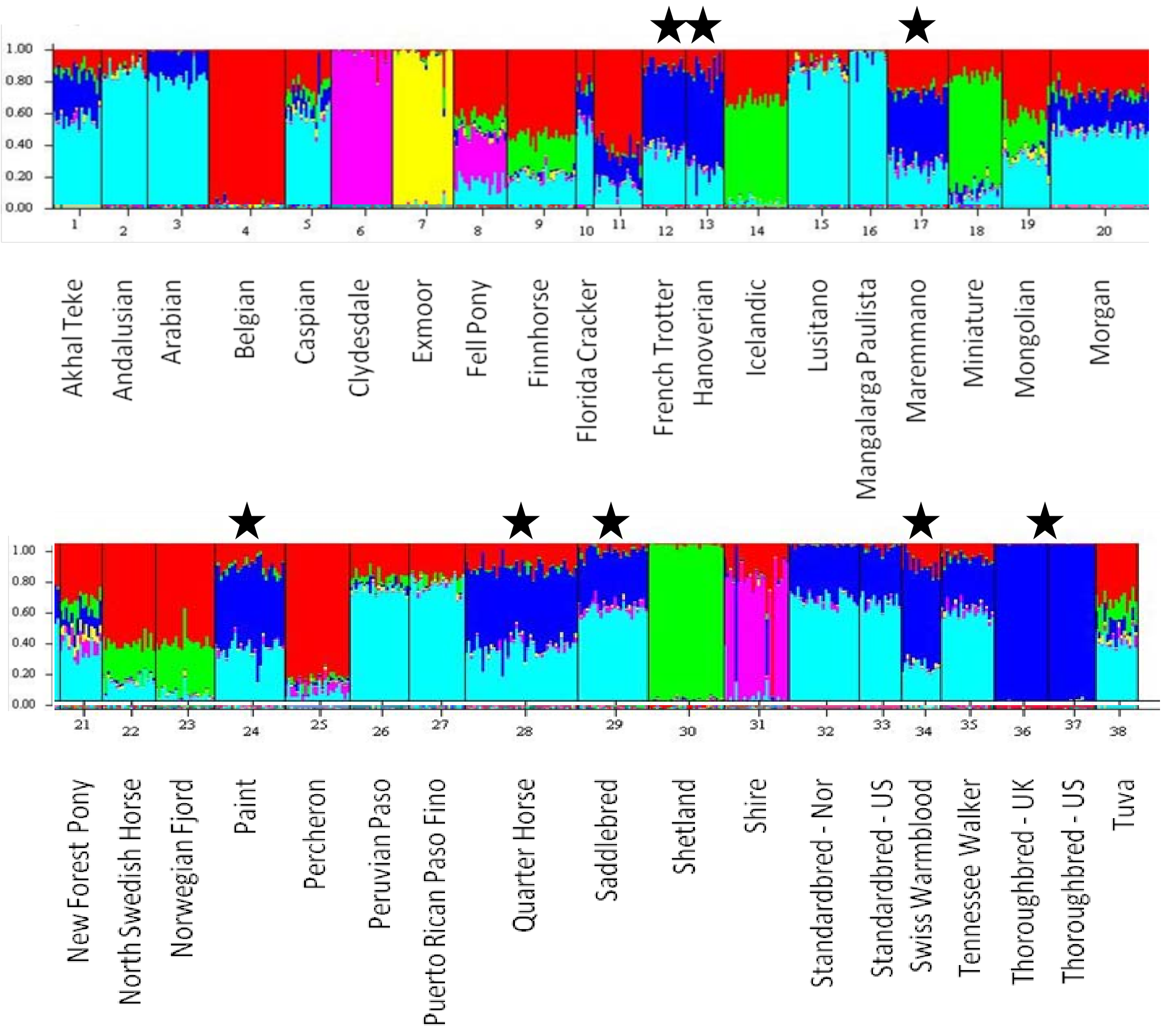




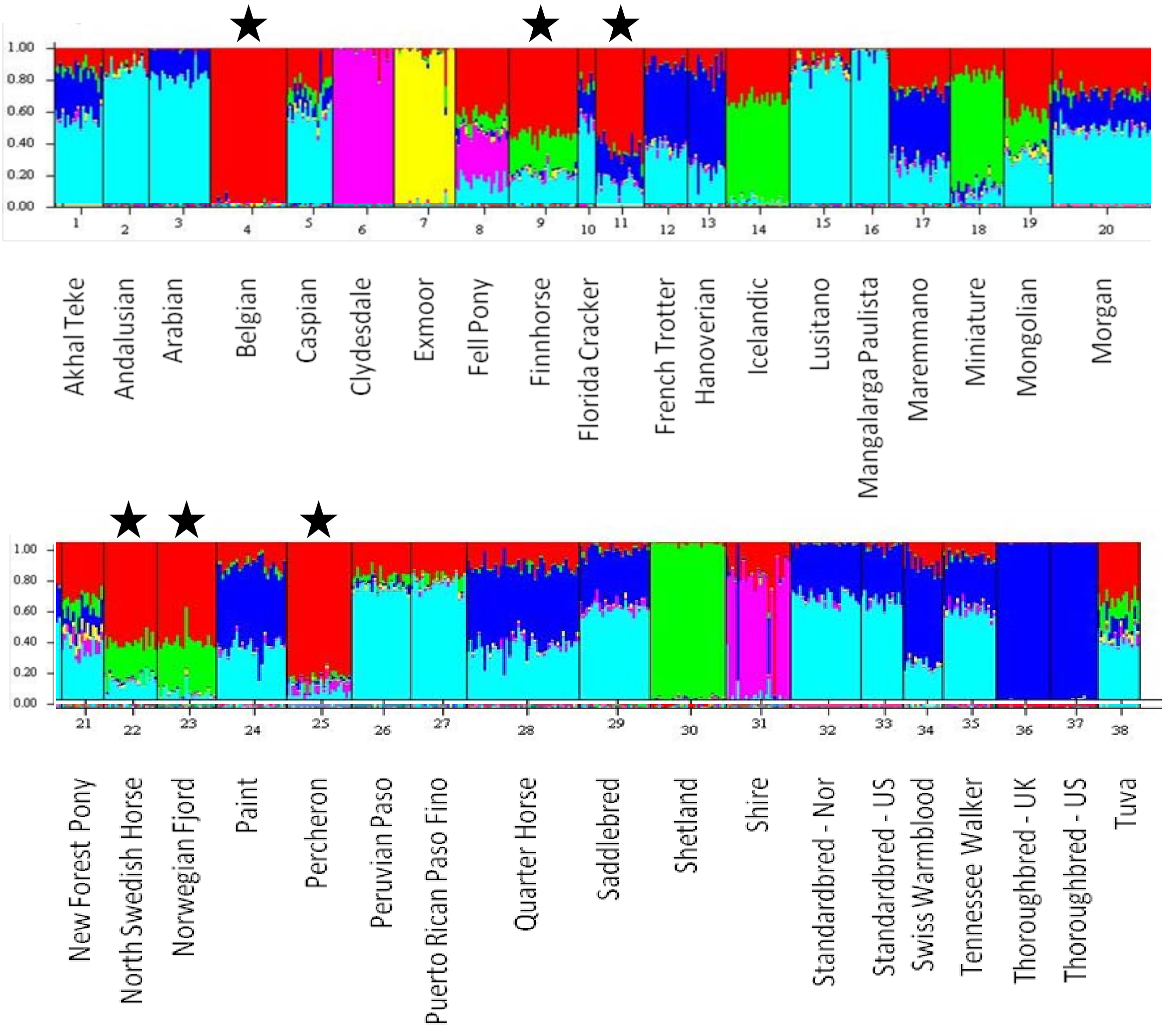
Structure for K = 6 (Middle East and Iberian)



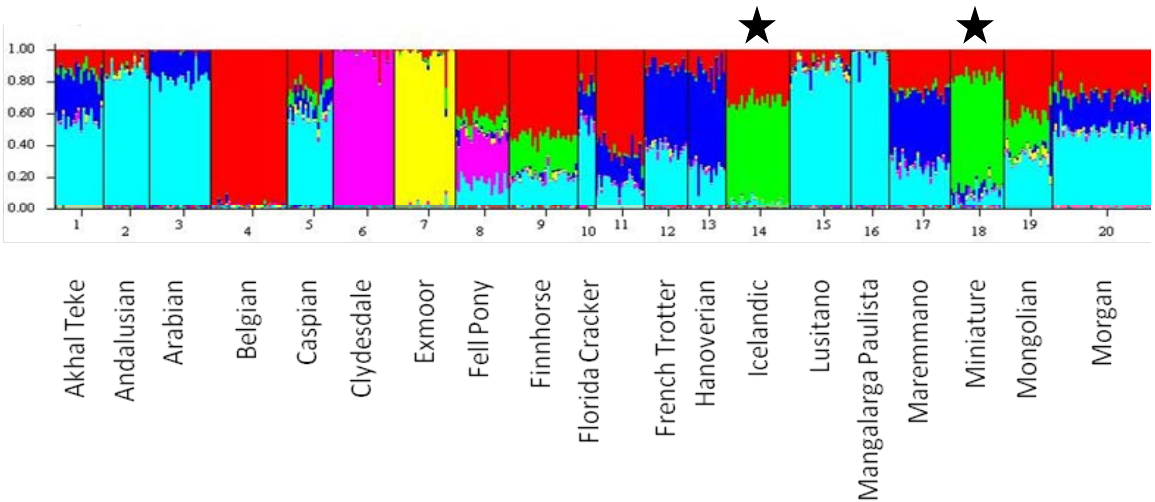
Structure for K = 6 (Thoroughbred)

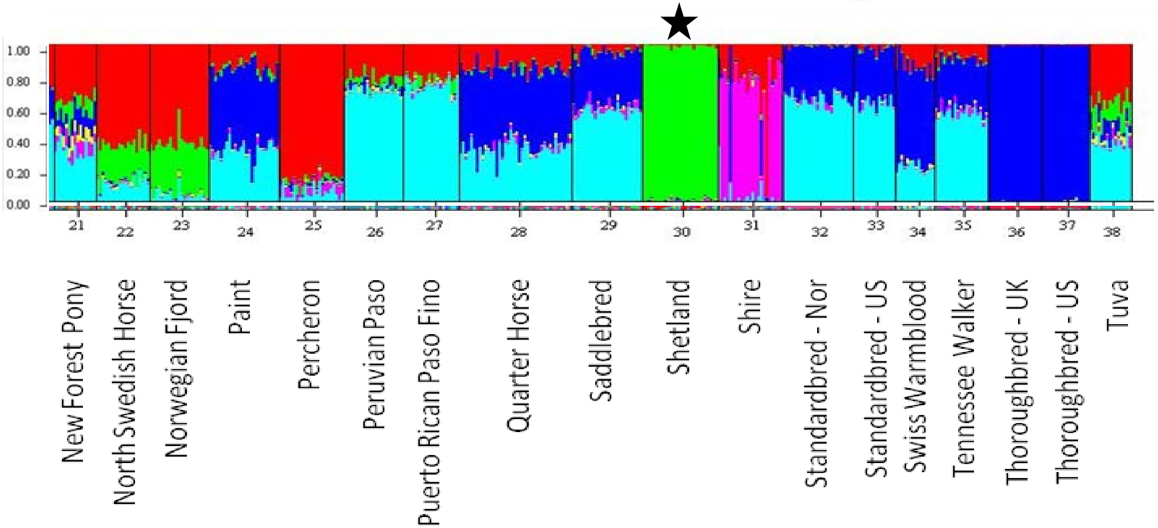


Structure for K = 6 (Scandinavian and N Europe)

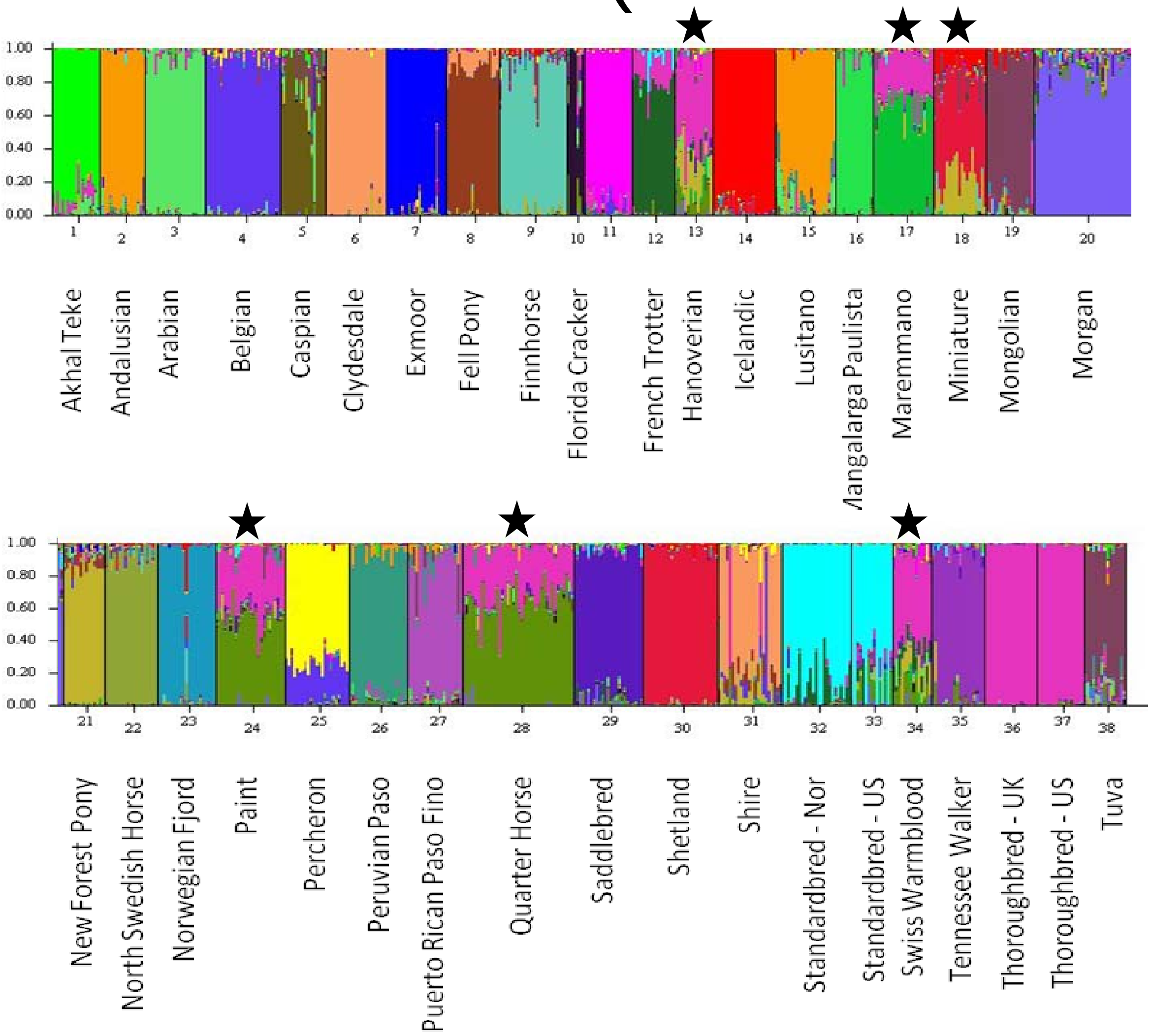


Structure for K = 6 (Shetland, Icelandic)





Structure for K = 29 (Admixed Breeds)



Structure Summary

- Several breeds fall out as distinct populations with K < 3.
- Geographic groups are evident at K = 6.
- Most breeds fall out as distinct populations with K = 29.
- Some breeds remain clearly admixed at K - 29.

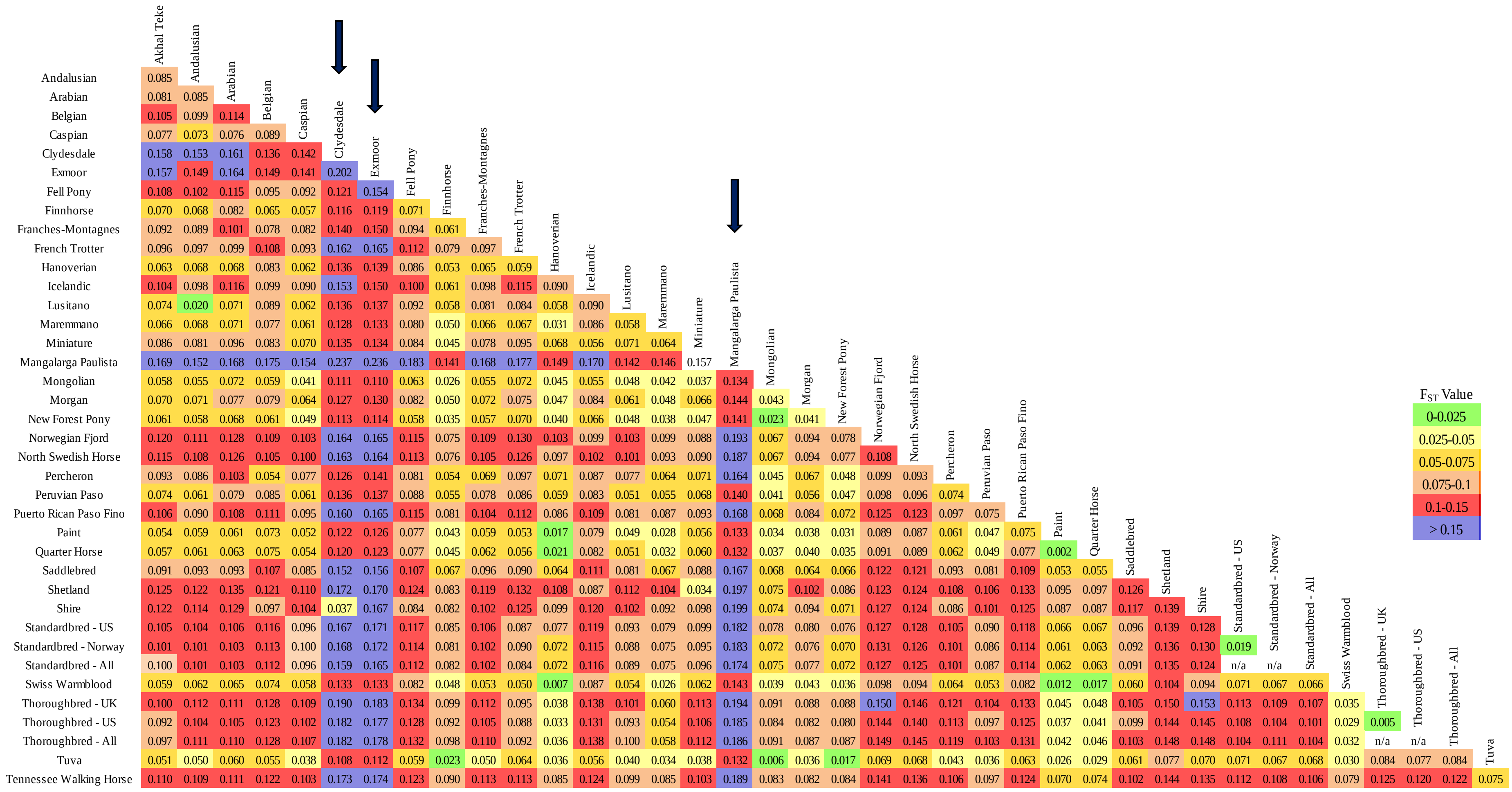
Pairwise FST Values Calculated Using 6,028 Autosomal SNPs

	Akhal Teke	Andalusian	Arabian	Belgian	Caspian	Clydesdale	Exmoor	Fell Pony	Finnhorse	Franches-Montagnes	French Trotter	Hanoverian	Icelandic	Lusitano	Maremmano	Miniature	Mangalarga Paulista	Mongolian	Morgan	New Forest Pony	Norwegian Fjord	North Swedish Horse	Percheron	Peruvian Paso	Puerto Rican Paso Fino	Paint	Quarter Horse	Saddlebred	Shetland	Shire	Standardbred - US	Standardbred - Norway	Standardbred - All	Swiss Warmblood	Thoroughbred - UK	Thoroughbred - US	Thoroughbred - All	Tuva
Andalusian	0.085																																					
Arabian	0.081	0.085																																				
Belgian	0.105	0.099	0.114																																			
Caspian	0.077	0.073	0.076	0.089																																		
Clydesdale	0.158	0.153	0.161	0.136	0.142																																	
Exmoor	0.157	0.149	0.164	0.149	0.141	0.202																																
Fell Pony	0.108	0.102	0.115	0.095	0.092	0.121	0.154																															
Finnhorse	0.070	0.068	0.082	0.065	0.057	0.116	0.119	0.071																														
Franches-Montagnes	0.092	0.089	0.101	0.078	0.082	0.140	0.150	0.094	0.061																													
French Trotter	0.096	0.097	0.099	0.108	0.093	0.162	0.165	0.112	0.079	0.097																												
Hanoverian	0.063	0.068	0.068	0.083	0.062	0.136	0.139	0.086	0.053	0.065	0.059																											
Icelandic	0.104	0.098	0.116	0.099	0.090	0.153	0.150	0.100	0.061	0.098	0.115	0.090																										
Lusitano	0.074	0.020	0.071	0.089	0.062	0.136	0.137	0.092	0.058	0.081	0.084	0.058	0.090																									
Maremmano	0.066	0.068	0.071	0.077	0.061	0.128	0.133	0.080	0.050	0.066	0.067	0.031	0.086	0.058																								
Miniature	0.086	0.081	0.096	0.083	0.070	0.135	0.134	0.084	0.045	0.078	0.095	0.068	0.056	0.071	0.064																							
Mangalarga Paulista	0.169	0.152	0.168	0.175	0.154	0.237	0.236	0.183	0.141	0.168	0.177	0.149	0.170	0.142	0.146	0.157																						
Mongolian	0.058	0.055	0.072	0.059	0.041	0.111	0.110	0.063	0.026	0.055	0.072	0.045	0.055	0.048	0.042	0.037	0.134																					
Morgan	0.070	0.071	0.077	0.079	0.064	0.127	0.130	0.082	0.050	0.072	0.075	0.047	0.084	0.061	0.048	0.066	0.144	0.043																				
New Forest Pony	0.061	0.058	0.068	0.061	0.049	0.113	0.114	0.058	0.035	0.057	0.070	0.040	0.066	0.048	0.038	0.047	0.141	0.023	0.041																			
Norwegian Fjord	0.120	0.111	0.128	0.109	0.103	0.164	0.165	0.115	0.075	0.109	0.130	0.103	0.099	0.103	0.099	0.088	0.193	0.067	0.094	0.078																		
North Swedish Horse	0.115	0.108	0.126	0.105	0.100	0.163	0.164	0.113	0.076	0.105	0.126	0.097	0.102	0.101	0.093	0.090	0.187	0.067	0.094	0.077	0.108																	
Percheron	0.093	0.086	0.103	0.054	0.077	0.126	0.141	0.081	0.054	0.069	0.097	0.071	0.087	0.077	0.064	0.071	0.164	0.045	0.067	0.048	0.099	0.093																
Peruvian Paso	0.074	0.061	0.079	0.085	0.061	0.136	0.137	0.088	0.055	0.078	0.086	0.059	0.083	0.051	0.055	0.068	0.140	0.041	0.056	0.047	0.098	0.096	0.074															
Puerto Rican Paso Fino	0.106	0.090	0.108	0.111	0.095	0.160	0.165	0.115	0.081	0.104	0.112	0.086	0.109	0.081	0.087	0.093	0.168	0.068	0.084	0.072	0.125	0.123	0.097	0.075														
Paint	0.054	0.059	0.061	0.073	0.052	0.122	0.126	0.077	0.043	0.059	0.053	0.017	0.079	0.049	0.028	0.056	0.133	0.034	0.038	0.031	0.089	0.087	0.061	0.047	0.075													
Quarter Horse	0.057	0.061	0.063	0.075	0.054	0.120	0.123	0.077	0.045	0.062	0.056	0.021	0.082	0.051	0.032	0.060	0.132	0.037	0.040	0.035	0.091	0.089	0.062	0.049	0.077	0.002												
Saddlebred	0.091	0.093	0.093	0.107	0.085	0.152	0.156	0.107	0.067	0.096	0.090	0.064	0.111	0.081	0.067	0.088	0.167	0.068	0.064	0.066	0.122	0.121	0.093	0.081	0.109	0.053	0.055											
Shetland	0.125	0.122	0.135	0.121	0.110	0.172	0.170	0.124	0.083	0.119	0.132	0.108	0.087	0.112	0.104	0.034	0.197	0.075	0.102	0.086	0.123	0.124	0.108	0.106	0.133	0.095	0.097	0.126										
Shire	0.122	0.114	0.129	0.097	0.104	0.037	0.167	0.084	0.082	0.102	0.125	0.099	0.120	0.102	0.092	0.098	0.199	0.074	0.094	0.071	0.127	0.124	0.086	0.101	0.125	0.087	0.087	0.117	0.139									
Standardbred - US	0.105	0.104	0.106	0.116	0.096	0.167	0.171	0.117	0.085	0.106	0.087	0.077	0.119	0.093	0.079	0.099	0.182	0.078	0.080	0.076	0.127	0.128	0.105	0.090	0.118	0.066	0.067	0.096	0.139	0.128								
Standardbred - Norway	0.101	0.101	0.103	0.113	0.100	0.168	0.172	0.114	0.081	0.102	0.090	0.072	0.115	0.088	0.075	0.095	0.183	0.072	0.076	0.070	0.131	0.126	0.101	0.086	0.114	0.061	0.063	0.092	0.136	0.130	0.019							
Standardbred - All	0.100	0.101	0.103	0.112	0.096	0.159	0.165	0.112	0.082	0.102	0.084	0.072	0.116	0.089	0.075	0.096	0.174	0.075	0.077	0.072	0.127	0.125	0.101	0.087	0.114	0.062	0.063	0.091	0.135	0.124	n/a	n/a						
Swiss Warmblood	0.059	0.062	0.065	0.074	0.058	0.133	0.133	0.082	0.048	0.053	0.050	0.007	0.087	0.054	0.026	0.062	0.143	0.039	0.043	0.036	0.098	0.094	0.064	0.053	0.082	0.012	0.017	0.060	0.104	0.094	0.071	0.067	0.066					
Thoroughbred - UK	0.100	0.112	0.111	0.128	0.109	0.190	0.183	0.134	0.099	0.112	0.095	0.038	0.138	0.101	0.060	0.113	0.194	0.091	0.088	0.088	0.150	0.146	0.121	0.104	0.133	0.045	0.048	0.105	0.150	0.153	0.113	0.109	0.107	0.035				
Thoroughbred - US	0.092	0.104	0.105	0.123	0.102	0.182	0.177	0.128	0.092	0.105	0.088	0.033	0.131	0.093	0.054	0.106	0.185	0.084	0.082	0.080	0.144	0.140	0.113	0.097	0.125	0.037	0.041	0.099	0.144	0.145	0.108	0.104	0.101	0.029	0.005			
Thoroughbred - All	0.097	0.111	0.110	0.128	0.107	0.182	0.178	0.132	0.098	0.110	0.092	0.036	0.138	0.100	0.058	0.112	0.186	0.091	0.087	0.087	0.149	0.145	0.119	0.103	0.131	0.042	0.046	0.103	0.148	0.148	0.104	0.111	0.104	0.032	n/a	n/a		
Tuva	0.051	0.050	0.060	0.055	0.038	0.108	0.112	0.059	0.023	0.050	0.064	0.036	0.056	0.040	0.034	0.038	0.132	0.006	0.036	0.017	0.069	0.068	0.043	0.036	0.063	0.026	0.029	0.061	0.077	0.070	0.071	0.067	0.068	0.030	0.084	0.077	0.084	
Tennessee Walking Horse	0.110	0.109	0.111	0.122	0.103	0.173	0.174	0.123	0.090	0.113	0.113	0.085	0.124	0.099	0.085	0.103	0.189	0.083	0.082	0.084	0.141	0.136	0.106	0.097	0.124	0.070	0.074	0.102	0.144	0.135	0.112	0.108	0.106	0.079	0.125	0.120	0.122	0.075

F_{ST} Value

- 🟩 0-0.025
- 🟨 0.025-0.05
- 🟨 0.05-0.075
- 🟧 0.075-0.1
- 🟥 0.1-0.15
- 🟦 > 0.15

Pairwise FST



	Akhal Teke	Andalusian	Arabian	Belgian	Caspian	Clydesdale	Exmoor	Fell Pony	Finnhorse	Franches-Montagnes	French Trotter	Hanoverian	Icelandic	Lusitano	Maremmano	Miniature	Mangalarga Paulista	Mongolian	Morgan	New Forest Pony	Norwegian Fjord	North Swedish Horse	Percheron	Peruvian Paso	Puerto Rican Paso Fino	Paint	Quarter Horse	Saddlebred	Shetland	Shire	Standardbred - US	Standardbred - Norway	Standardbred - All	Swiss Warmblood	Thoroughbred - UK	Thoroughbred - US	Thoroughbred - All	Tuva
Andalusian	0.085																																					
Arabian	0.081	0.085																																				
Belgian	0.105	0.099	0.114																																			
Caspian	0.077	0.073	0.076	0.089																																		
Clydesdale	0.158	0.153	0.161	0.136	0.142																																	
Exmoor	0.157	0.149	0.164	0.149	0.141	0.202																																
Fell Pony	0.108	0.102	0.115	0.095	0.092	0.121	0.154																															
Finnhorse	0.070	0.068	0.082	0.065	0.057	0.116	0.119	0.071																														
Franches-Montagnes	0.092	0.089	0.101	0.078	0.082	0.140	0.150	0.094	0.061																													
French Trotter	0.096	0.097	0.099	0.108	0.093	0.162	0.165	0.112	0.079	0.097																												
Hanoverian	0.063	0.068	0.068	0.083	0.062	0.136	0.139	0.086	0.053	0.065	0.059																											
Icelandic	0.104	0.098	0.116	0.099	0.090	0.153	0.150	0.100	0.061	0.098	0.115	0.090																										
Lusitano	0.074	0.020	0.071	0.089	0.062	0.136	0.137	0.092	0.058	0.081	0.084	0.058	0.090																									
Maremmano	0.066	0.068	0.071	0.077	0.061	0.128	0.133	0.080	0.050	0.066	0.067	0.031	0.086	0.058																								
Miniature	0.086	0.081	0.096	0.083	0.070	0.135	0.134	0.084	0.045	0.078	0.095	0.068	0.056	0.071	0.064																							
Mangalarga Paulista	0.169	0.152	0.168	0.175	0.154	0.237	0.236	0.183	0.141	0.168	0.177	0.149	0.170	0.142	0.146	0.157																						
Mongolian	0.058	0.055	0.072	0.059	0.041	0.111	0.110	0.063	0.026	0.055	0.072	0.045	0.055	0.048	0.042	0.037	0.134																					
Morgan	0.070	0.071	0.077	0.079	0.064	0.127	0.130	0.082	0.050	0.072	0.075	0.047	0.084	0.061	0.048	0.066	0.144	0.043																				
New Forest Pony	0.061	0.058	0.068	0.061	0.049	0.113	0.114	0.058	0.035	0.057	0.070	0.040	0.066	0.048	0.038	0.047	0.141	0.023	0.041																			
Norwegian Fjord	0.120	0.111	0.128	0.109	0.103	0.164	0.165	0.115	0.075	0.109	0.130	0.103	0.099	0.103	0.099	0.088	0.193	0.067	0.094	0.078																		
North Swedish Horse	0.115	0.108	0.126	0.105	0.100	0.163	0.164	0.113	0.076	0.105	0.126	0.097	0.102	0.101	0.093	0.090	0.187	0.067	0.094	0.077	0.108																	
Percheron	0.093	0.086	0.103	0.054	0.077	0.126	0.141	0.081	0.054	0.069	0.097	0.071	0.087	0.077	0.064	0.071	0.164	0.045	0.067	0.048	0.099	0.093																
Peruvian Paso	0.074	0.061	0.079	0.085	0.061	0.136	0.137	0.088	0.055	0.078	0.086	0.059	0.083	0.051	0.055	0.068	0.140	0.041	0.056	0.047	0.098	0.096	0.074															
Puerto Rican Paso Fino	0.106	0.090	0.108	0.111	0.095	0.160	0.165	0.115	0.081	0.104	0.112	0.086	0.109	0.081	0.087	0.093	0.168	0.068	0.084	0.072	0.125	0.123	0.097	0.075														
Paint	0.054	0.059	0.061	0.073	0.052	0.122	0.126	0.077	0.043	0.059	0.053	0.017	0.079	0.049	0.028	0.056	0.133	0.034	0.038	0.031	0.089	0.087	0.061	0.047	0.075													
Quarter Horse	0.057	0.061	0.063	0.075	0.054	0.120	0.123	0.077	0.045	0.062	0.056	0.021	0.082	0.051	0.032	0.060	0.132	0.037	0.040	0.035	0.091	0.089	0.062	0.049	0.077	0.002												
Saddlebred	0.091	0.093	0.093	0.107	0.085	0.152	0.156	0.107	0.067	0.096	0.090	0.064	0.111	0.081	0.067	0.088	0.167	0.068	0.064	0.066	0.122	0.121	0.093	0.081	0.109	0.053	0.055											
Shetland	0.125	0.122	0.135	0.121	0.110	0.172	0.170	0.124	0.083	0.119	0.132	0.108	0.087	0.112	0.104	0.034	0.197	0.075	0.102	0.086	0.123	0.124	0.108	0.106	0.133	0.095	0.097	0.126										
Shire	0.122	0.114	0.129	0.097	0.104	0.037	0.167	0.084	0.082	0.102	0.125	0.099	0.120	0.102	0.092	0.098	0.199	0.074	0.094	0.071	0.127	0.124	0.086	0.101	0.125	0.087	0.087	0.117	0.139									
Standardbred - US	0.105	0.104	0.106	0.116	0.096	0.167	0.171	0.117	0.085	0.106	0.087	0.077	0.119	0.093	0.079	0.099	0.182	0.078	0.080	0.076	0.127	0.128	0.105	0.090	0.118	0.066	0.067	0.096	0.139	0.128								
Standardbred - Norway	0.101	0.101	0.103	0.113	0.100	0.168	0.172	0.114	0.081	0.102	0.090	0.072	0.115	0.088	0.075	0.095	0.183	0.072	0.076	0.070	0.131	0.126	0.101	0.086	0.114	0.061	0.063	0.092	0.136	0.130	0.019							
Standardbred - All	0.100	0.101	0.103	0.112	0.096	0.159	0.165	0.112	0.082	0.102	0.084	0.072	0.116	0.089	0.075	0.096	0.174	0.075	0.077	0.072	0.127	0.125	0.101	0.087	0.114	0.062	0.063	0.091	0.135	0.124	n/a	n/a						
Swiss Warmblood	0.059	0.062	0.065	0.074	0.058	0.133	0.133	0.082	0.048	0.053	0.050	0.007	0.087	0.054	0.026	0.062	0.143	0.039	0.043	0.036	0.098	0.094	0.064	0.053	0.082	0.012	0.017	0.060	0.104	0.094	0.071	0.067	0.066					
Thoroughbred - UK	0.100	0.112	0.111	0.128	0.109	0.190	0.183	0.134	0.099	0.112	0.095	0.038	0.138	0.101	0.060	0.113	0.194	0.091	0.088	0.088	0.150	0.146	0.121	0.104	0.133	0.045	0.048	0.105	0.150	0.153	0.113	0.109	0.107	0.035				
Thoroughbred - US	0.092	0.104	0.105	0.123	0.102	0.182	0.177	0.128	0.092	0.105	0.088	0.033	0.131	0.093	0.054	0.106	0.185	0.084	0.082	0.080	0.144	0.140	0.113	0.097	0.125	0.037	0.041	0.099	0.144	0.145	0.108	0.104	0.101	0.029	0.005			
Thoroughbred - All	0.097	0.111	0.110	0.128	0.107	0.182	0.178	0.132	0.098	0.110	0.092	0.036	0.138	0.100	0.058	0.112	0.186	0.091	0.087	0.087	0.149	0.145	0.119	0.103	0.131	0.042	0.046	0.103	0.148	0.148	0.104	0.111	0.104	0.032	n/a	n/a		
Tuva	0.051	0.050	0.060	0.055	0.038	0.108	0.112	0.059	0.023	0.050	0.064	0.036	0.056	0.040	0.034	0.038	0.132	0.006	0.036	0.017	0.069	0.068	0.043	0.036	0.063	0.026	0.029	0.061	0.077	0.070	0.071	0.067	0.068	0.030	0.084	0.077	0.084	
Tennessee Walking Horse	0.110	0.109	0.111	0.122	0.103	0.173	0.174	0.123	0.090	0.113	0.113	0.085	0.124	0.099	0.085	0.103	0.189	0.083	0.082	0.084	0.141	0.136	0.106	0.097	0.124	0.070	0.074	0.102	0.144	0.135	0.112	0.108	0.106	0.079	0.125	0.120	0.122	0.075

F_{ST} Value

- 🟩 0-0.025
- 🟨 0.025-0.05
- 🟨 0.05-0.075
- 🟧 0.075-0.1
- 🟥 0.1-0.15
- 🟦 > 0.15

Pairwise FST

	Akhal Teke	Andalusian	Arabian	Belgian	Caspian	Clydesdale	Exmoor	Fell Pony	Finnhorse	Franches-Montagnes	French Trotter	Hanoverian	Icelandic	Lusitano	Maremmano	Miniature	Mangalarga Paulista	Mongolian	Morgan	New Forest Pony	Norwegian Fjord	North Swedish Horse	Percheron	Peruvian Paso	Puerto Rican Paso Fino	Paint	Quarter Horse	Saddlebred	Shetland	Shire	Standardbred - US	Standardbred - Norway	Standardbred - All	Swiss Warmblood	Thoroughbred - UK	Thoroughbred - US	Thoroughbred - All	Tuva
Andalusian	0.085																																					
Arabian	0.081	0.085																																				
Belgian	0.105	0.099	0.114																																			
Caspian	0.077	0.073	0.076	0.089																																		
Clydesdale	0.158	0.153	0.161	0.136	0.142																																	
Exmoor	0.157	0.149	0.164	0.149	0.141	0.202																																
Fell Pony	0.108	0.102	0.115	0.095	0.092	0.121	0.154																															
Finnhorse	0.070	0.068	0.082	0.065	0.057	0.116	0.119	0.071																														
Franches-Montagnes	0.092	0.089	0.101	0.078	0.082	0.140	0.150	0.094	0.061																													
French Trotter	0.096	0.097	0.099	0.108	0.093	0.162	0.165	0.112	0.079	0.097																												
Hanoverian	0.063	0.068	0.068	0.083	0.062	0.136	0.139	0.086	0.053	0.065	0.059																											
Icelandic	0.104	0.098	0.116	0.099	0.090	0.153	0.150	0.100	0.061	0.098	0.115	0.090																										
Lusitano	0.074	0.020	0.071	0.089	0.062	0.136	0.137	0.092	0.058	0.081	0.084	0.058	0.090																									
Maremmano	0.066	0.068	0.071	0.077	0.061	0.128	0.133	0.080	0.050	0.066	0.067	0.031	0.086	0.058																								
Miniature	0.086	0.081	0.096	0.083	0.070	0.135	0.134	0.084	0.045	0.078	0.095	0.068	0.056	0.071	0.064																							
Mangalarga Paulista	0.169	0.152	0.168	0.175	0.154	0.237	0.236	0.183	0.141	0.168	0.177	0.149	0.170	0.142	0.146	0.157																						
Mongolian	0.058	0.055	0.072	0.059	0.041	0.111	0.110	0.063	0.026	0.055	0.072	0.045	0.055	0.048	0.042	0.037	0.134																					
Morgan	0.070	0.071	0.077	0.079	0.064	0.127	0.130	0.082	0.050	0.072	0.075	0.047	0.084	0.061	0.048	0.066	0.144	0.043																				
New Forest Pony	0.061	0.058	0.068	0.061	0.049	0.113	0.114	0.058	0.035	0.057	0.070	0.040	0.066	0.048	0.038	0.047	0.141	0.023	0.041																			
Norwegian Fjord	0.120	0.111	0.128	0.109	0.103	0.164	0.165	0.115	0.075	0.109	0.130	0.103	0.099	0.103	0.099	0.088	0.193	0.067	0.094	0.078																		
North Swedish Horse	0.115	0.108	0.126	0.105	0.100	0.163	0.164	0.113	0.076	0.105	0.126	0.097	0.102	0.101	0.093	0.090	0.187	0.067	0.094	0.077	0.108																	
Percheron	0.093	0.086	0.103	0.054	0.077	0.126	0.141	0.081	0.054	0.069	0.097	0.071	0.087	0.077	0.064	0.071	0.164	0.045	0.067	0.048	0.099	0.093																
Peruvian Paso	0.074	0.061	0.079	0.085	0.061	0.136	0.137	0.088	0.055	0.078	0.086	0.059	0.083	0.051	0.055	0.068	0.140	0.041	0.056	0.047	0.098	0.096	0.074															
Puerto Rican Paso Fino	0.106	0.090	0.108	0.111	0.095	0.160	0.165	0.115	0.081	0.104	0.112	0.086	0.109	0.081	0.087	0.093	0.168	0.068	0.084	0.072	0.125	0.123	0.097	0.075														
Paint	0.054	0.059	0.061	0.073	0.052	0.122	0.126	0.077	0.043	0.059	0.053	0.017	0.079	0.049	0.028	0.056	0.133	0.034	0.038	0.031	0.089	0.087	0.061	0.047	0.075													
Quarter Horse	0.057	0.061	0.063	0.075	0.054	0.120	0.123	0.077	0.045	0.062	0.056	0.021	0.082	0.051	0.032	0.060	0.132	0.037	0.040	0.035	0.091	0.089	0.062	0.049	0.077	0.002												
Saddlebred	0.091	0.093	0.093	0.107	0.085	0.152	0.156	0.107	0.067	0.096	0.090	0.064	0.111	0.081	0.067	0.088	0.167	0.068	0.064	0.066	0.122	0.121	0.093	0.081	0.109	0.053	0.055											
Shetland	0.125	0.122	0.135	0.121	0.110	0.172	0.170	0.124	0.083	0.119	0.132	0.108	0.087	0.112	0.104	0.034	0.197	0.075	0.102	0.086	0.123	0.124	0.108	0.106	0.133	0.095	0.097	0.126										
Shire	0.122	0.114	0.129	0.097	0.104	0.037	0.167	0.084	0.082	0.102	0.125	0.099	0.120	0.102	0.092	0.098	0.199	0.074	0.094	0.071	0.127	0.124	0.086	0.101	0.125	0.087	0.087	0.117	0.139									
Standardbred - US	0.105	0.104	0.106	0.116	0.096	0.167	0.171	0.117	0.085	0.106	0.087	0.077	0.119	0.093	0.079	0.099	0.182	0.078	0.080	0.076	0.127	0.128	0.105	0.090	0.118	0.066	0.067	0.096	0.139	0.128								
Standardbred - Norway	0.101	0.101	0.103	0.113	0.100	0.168	0.172	0.114	0.081	0.102	0.090	0.072	0.115	0.088	0.075	0.095	0.183	0.072	0.076	0.070	0.131	0.126	0.101	0.086	0.114	0.061	0.063	0.092	0.136	0.130	0.019							
Standardbred - All	0.100	0.101	0.103	0.112	0.096	0.159	0.165	0.112	0.082	0.102	0.084	0.072	0.116	0.089	0.075	0.096	0.174	0.075	0.077	0.072	0.127	0.125	0.101	0.087	0.114	0.062	0.063	0.091	0.135	0.124	n/a	n/a						
Swiss Warmblood	0.059	0.062	0.065	0.074	0.058	0.133	0.133	0.082	0.048	0.053	0.050	0.007	0.087	0.054	0.026	0.062	0.143	0.039	0.043	0.036	0.098	0.094	0.064	0.053	0.082	0.012	0.017	0.060	0.104	0.094	0.071	0.067	0.066					
Thoroughbred - UK	0.100	0.112	0.111	0.128	0.109	0.190	0.183	0.134	0.099	0.112	0.095	0.038	0.138	0.101	0.060	0.113	0.194	0.091	0.088	0.088	0.150	0.146	0.121	0.104	0.133	0.045	0.048	0.105	0.150	0.153	0.113	0.109	0.107	0.035				
Thoroughbred - US	0.092	0.104	0.105	0.123	0.102	0.182	0.177	0.128	0.092	0.105	0.088	0.033	0.131	0.093	0.054	0.106	0.185	0.084	0.082	0.080	0.144	0.140	0.113	0.097	0.125	0.037	0.041	0.099	0.144	0.145	0.108	0.104	0.101	0.029	0.005			
Thoroughbred - All	0.097	0.111	0.110	0.128	0.107	0.182	0.178	0.132	0.098	0.110	0.092	0.036	0.138	0.100	0.058	0.112	0.186	0.091	0.087	0.087	0.149	0.145	0.119	0.103	0.131	0.042	0.046	0.103	0.148	0.148	0.104	0.111	0.104	0.032	n/a	n/a		
Tuva	0.051	0.050	0.060	0.055	0.038	0.108	0.112	0.059	0.023	0.050	0.064	0.036	0.056	0.040	0.034	0.038	0.132	0.006	0.036	0.017	0.069	0.068	0.043	0.036	0.063	0.026	0.029	0.061	0.077	0.070	0.071	0.067	0.068	0.030	0.084	0.077	0.084	
Tennessee Walking Horse	0.110	0.109	0.111	0.122	0.103	0.173	0.174	0.123	0.090	0.113	0.113	0.085	0.124	0.099	0.085	0.103	0.189	0.083	0.082	0.084	0.141	0.136	0.106	0.097	0.124	0.070	0.074	0.102	0.144	0.135	0.112	0.108	0.106	0.079	0.125	0.120	0.122	0.075

F_{ST} Value
0-0.025
0.025-0.05
0.05-0.075
0.075-0.1
0.1-0.15
> 0.15

Conclusions

- Low levels of between population divergence were observed in breeds that are relatively early on in the process of breed development, and in those with high levels of diversity, whether due to large population size, ongoing outcrossing, or large within-breed phenotypic diversity.
- Populations with low within-breed diversity include those which have experienced population bottlenecks, have been under intense selective pressure, or are closed populations with long breed histories.

Conclusions

- F_{ST} calculations, parsimony and distance analysis demonstrated relationships among the breeds that largely reflect geographic origins and known breed histories.
- The potential of whole genome SNP analysis to define relationships between and within breeds has been demonstrated.

Mean of estimated ln P(X|K) for each of the three runs for K=1-45 in Structure