

Keskkonnahariduse konverents 2025

Keskkonnaharidus kliimamuutuste tuultes

22.-23. oktoobril 2025



Hiiumaa Arenduskeskus



unesco

Biosfääri programmiala



KLIIMAMINISTEERIUM



Kaasrahastanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks

Paleofauna jäljed elurikkuses ja kliimas

Lembi Lõugas ja Kevin Sleetbos
Tallinna ja Tartu Ülikool & Läti Ülikool
Horizon Europe-MSCA Doctoral network

ArCHe
ArCHe



Hiiumaa Arenduskeskus



unesco

Biosfääri programmiala



KLIIMAMINISTEERIUM



Kaasrahastanud
Euroopa Liit



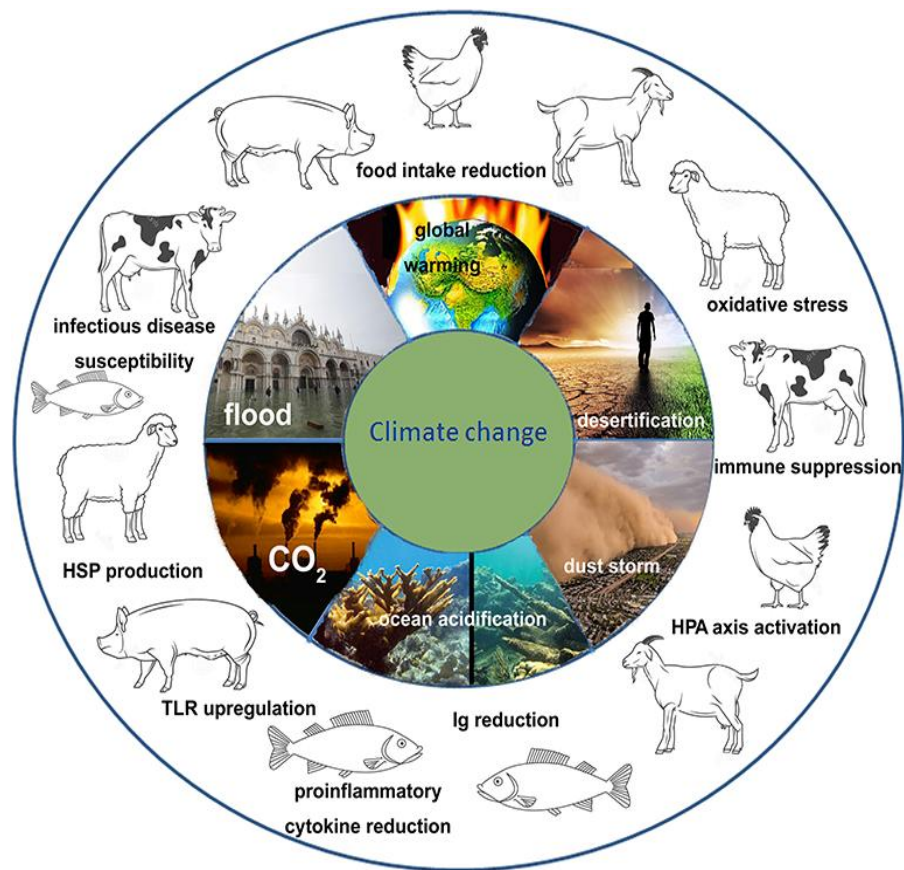
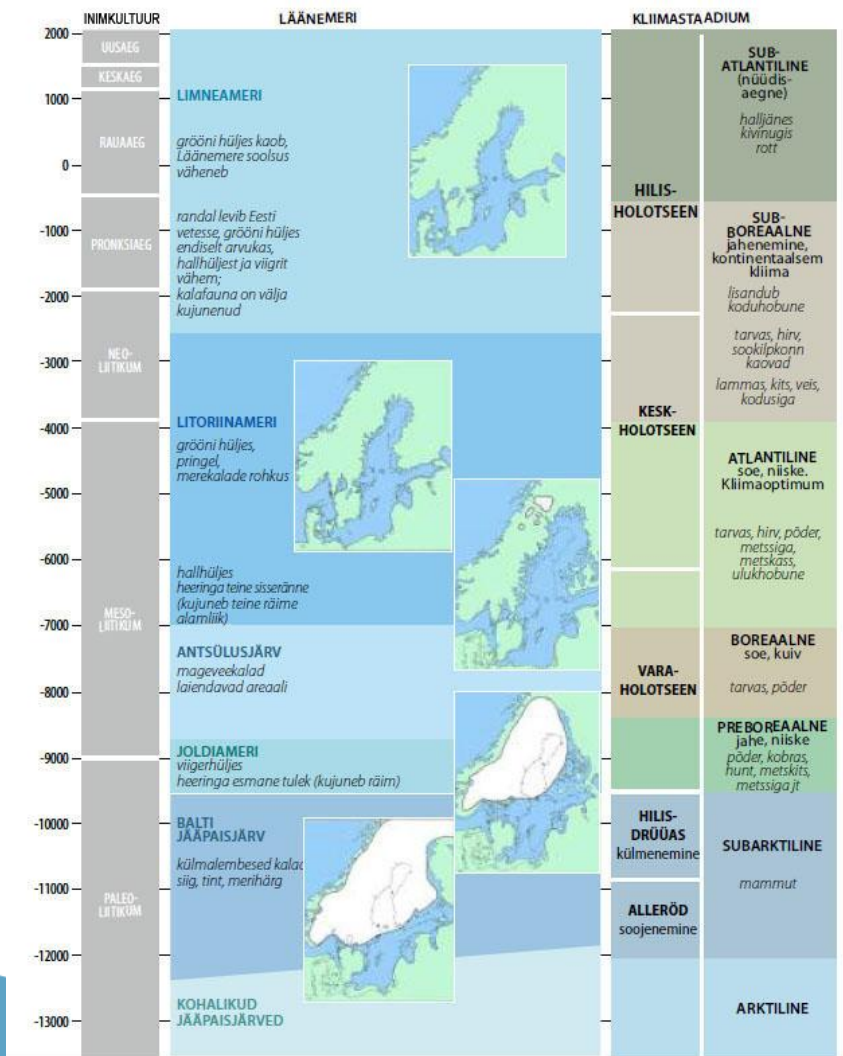
Eesti
tuleviku heaks

Ettekande teemad

- 1) Sissejuhatus
- 2) Uurimismaterjal, tõendid minevikust
- 3) Uurimismeetodid, sh arheozooloogilised ja molekulaarsed
- 4) Paleofauna ja inimese osast keskkonna, elurikkuse ja kliima rekonstruktsioonides
- 5) Suurimad paleofauna „jäljed“ Maa elurikkuses ja kliimas
- 6) Eesti näited
- 7) Kokkuvõte

1. Sissejuhatus teemasse

Inimese, keskkonna (sh loomastiku) ja kliima seostest läbi aja



Ajakiri: Frontiers Vet. Sci., 2020

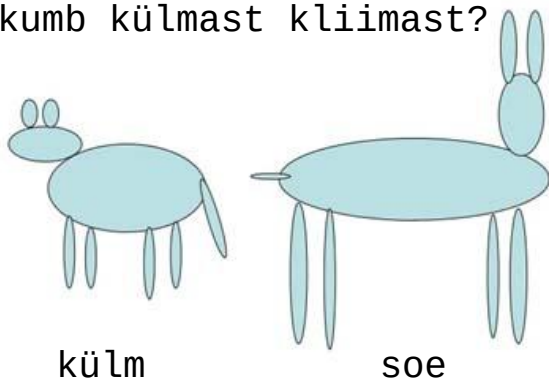
Materjalid arheoloogias. Kõrgkooliõpik. 2024

1. Sissejuhatus teemasse

Kas loomad kohanevad kliimamuutustega? Mis on paleofauna?

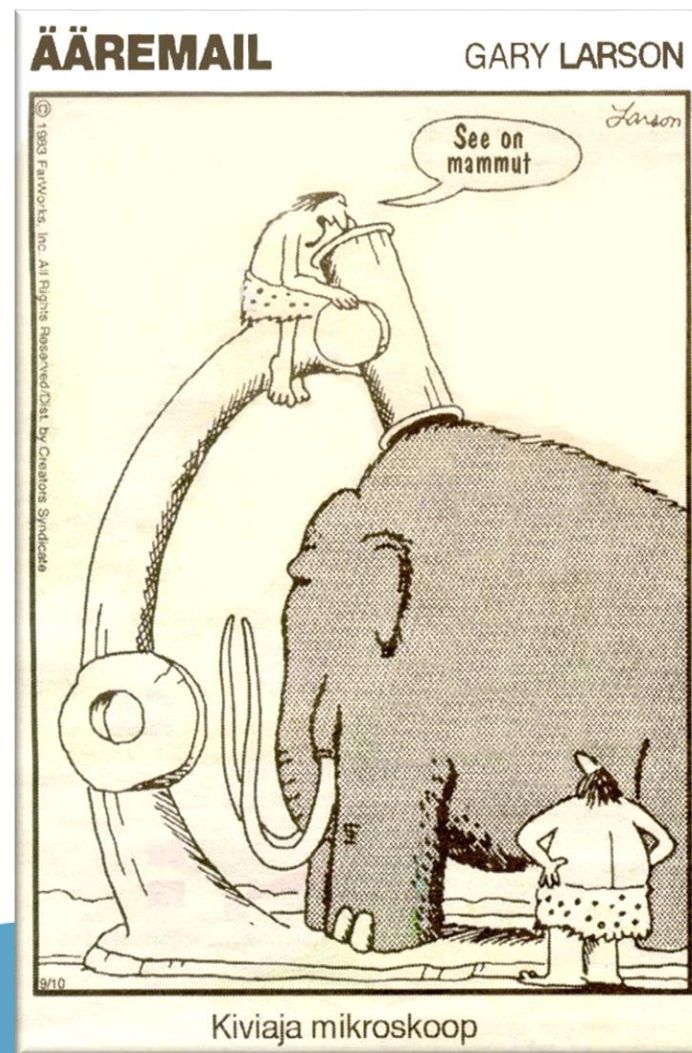
- 1) **Anatoomiline kohastumus** - nt on külmas kliimas elavatel suurematel loomadel üsna kompaktne kere ja seetõttu väiksem nahapind ning sh väiksem soojakadu; neil on ka paks talvine kasukas
- 2) **Käitumuslik kohastumus** - nt on külmas kliimas elavatel loomadel komme koguneda karjas üksteise vastu, et niiviisi sooja hoida.
- 3) **Füsioloogiline kohastumus** - neil on lihastes suur hulk müoglobiini, mis kannab palju hapnikku - neil on välja kujunenud keerukas soojusvahetussüsteem.

Kumb loom pärineb soojast ja kumb külmast kliimast?



külm

soe



Kiviaja mikroskoop

2. Uurimismaterjal, tõendid minevikust

Kuidas uurida mineviku fauna elurikkust ja seoseid kliimamuutustega?



ahvena otoliidid



pinnasest välja pestud kalaluud Kastrest



kalauim Kadrioru laevavrakist



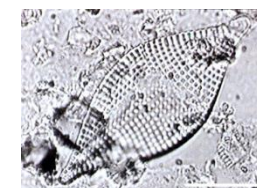
koera koproliidid Asvast



lambapabulad Tartust



parasiitide munad



ränivetikad



roti alalõualuu



lamba kolju



koera selgroog Saaremaalt Salmelt



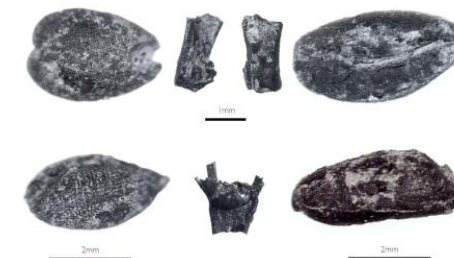
munakoored



putukate kitiinkestad



sookilpkonna kilbise tükid Tamulast



taimede seemned



2. Uurimismaterjal, tõendid minevikust

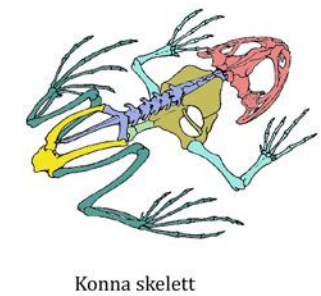
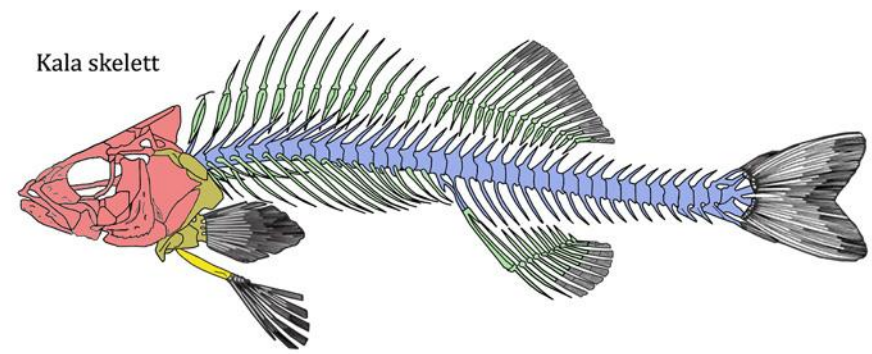
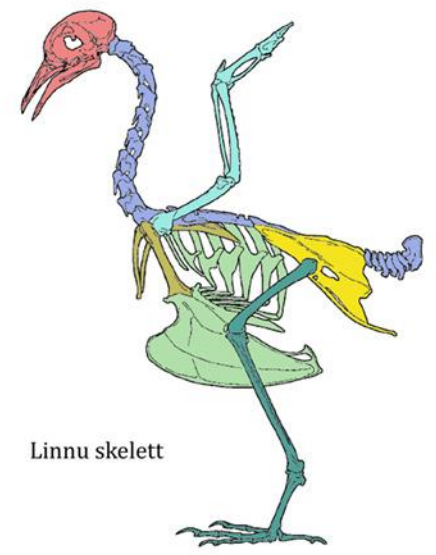
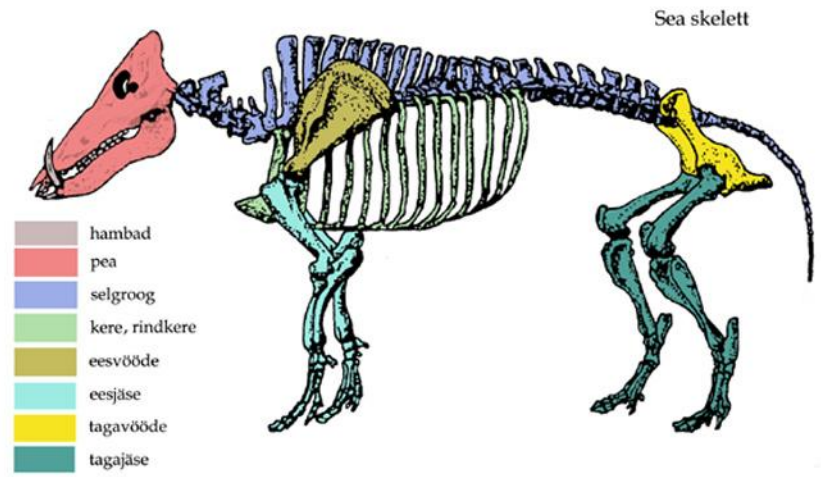
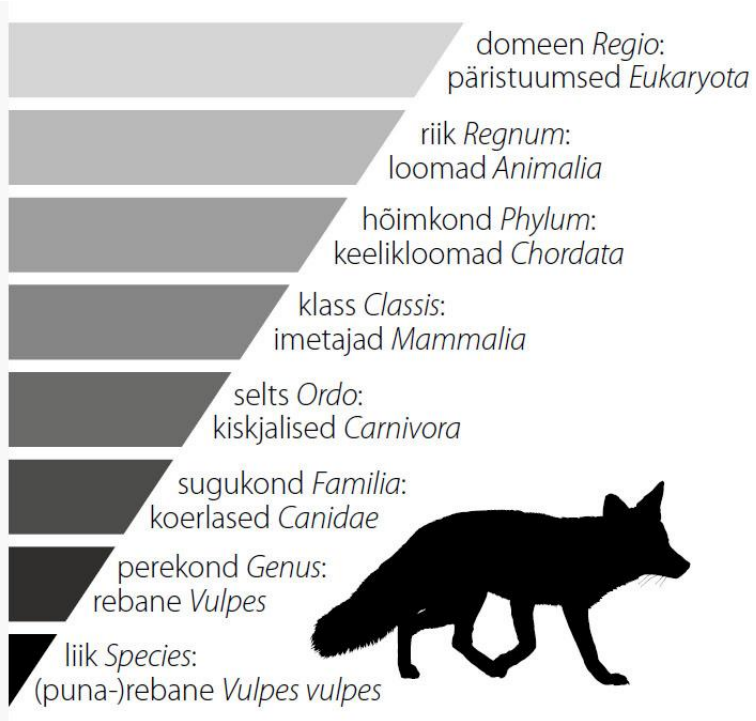
Kuidas uurida mineviku fauna elurikkust ja seoseid kliimamuutustega?



Arheoloogilised loomaluud

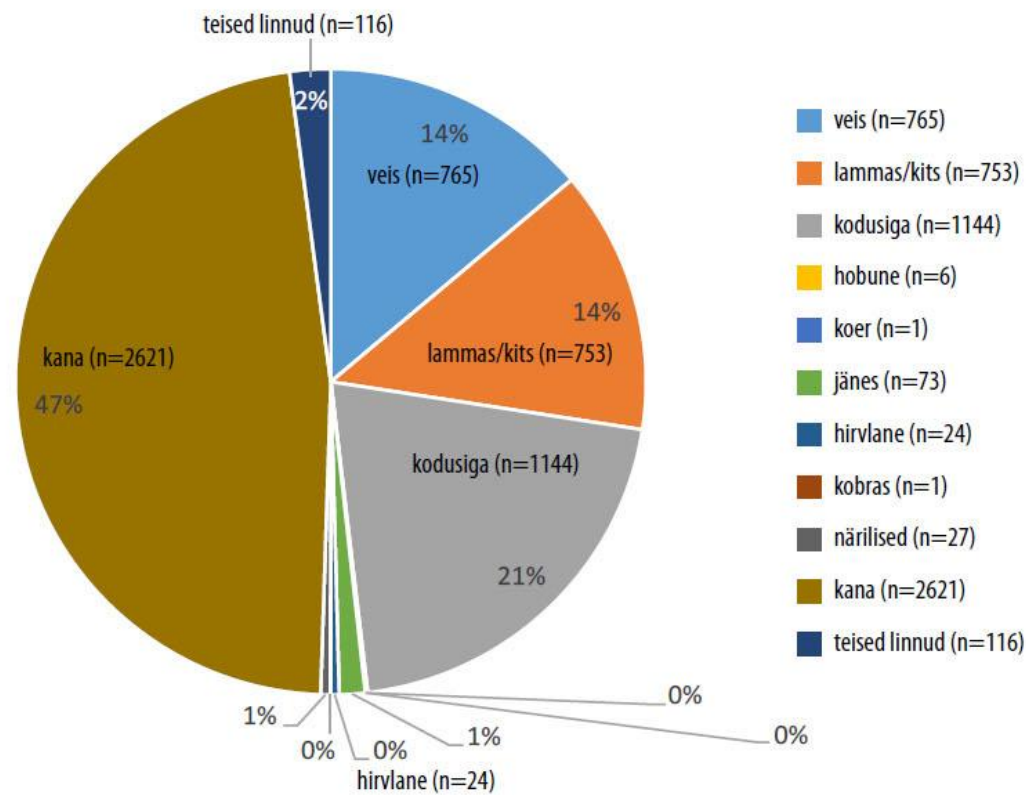
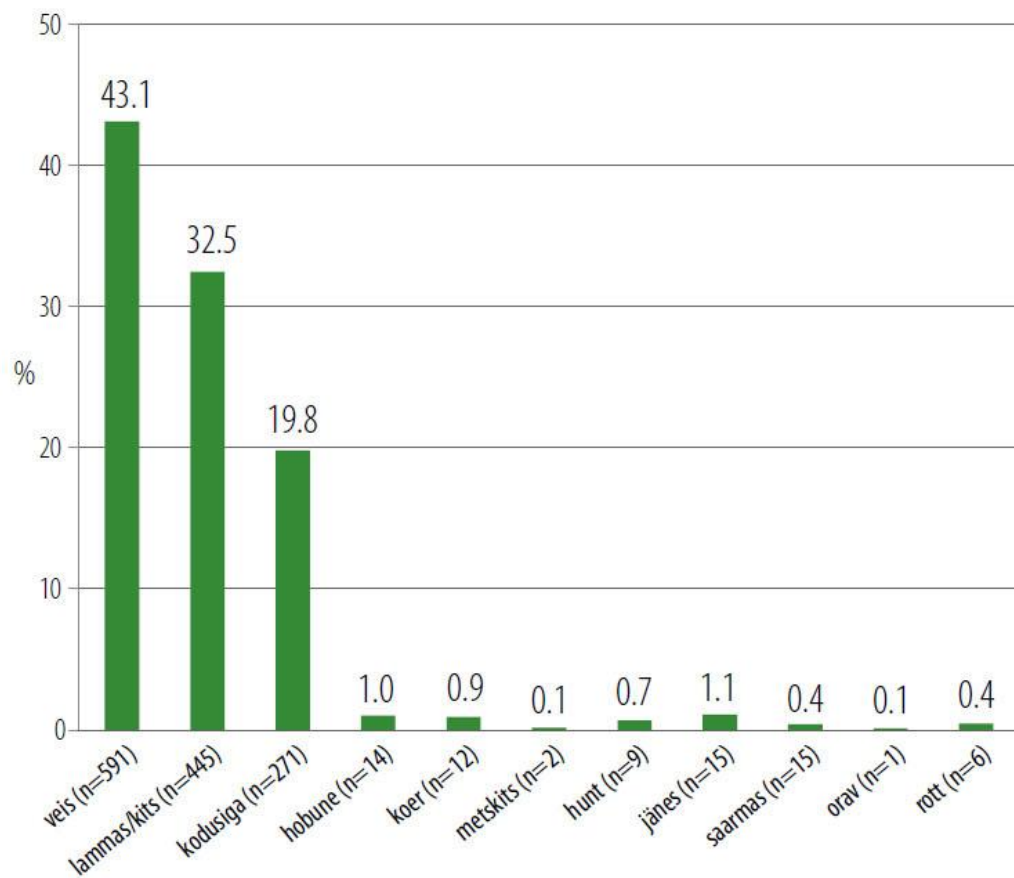
3. Meetodid

Kuidas uurida mineviku fauna elurikkust ja seoseid kliimamuutustega?
Arheozoologia meetodid.



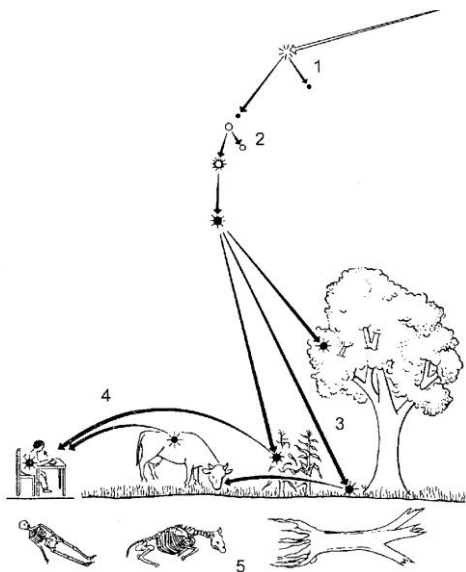
3. Meetodid

Kuidas uurida mineviku fauna elurikkust ja seoseid kliimamuutustega?
Arheozoologia meetodid.



3. Meetodid

Kuidas uurida mineviku fauna elurikkust ja seoseid kliimamuutustega?
Mis on peidus luu sees?



Joon. 1. Radioaktiivse süsiniku ringkäik looduses (C. W. Cerami järgi).

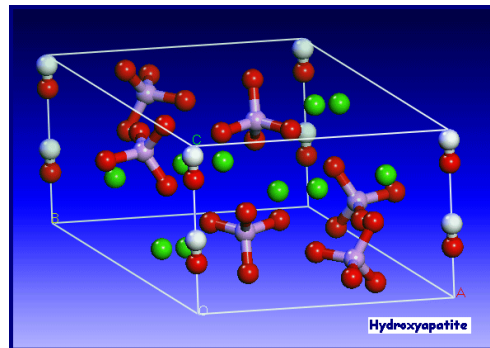
Stabiilsed isotoobid:

^{12}C ^{13}C

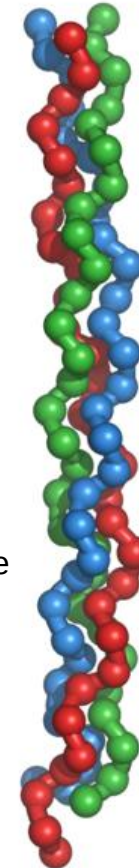
^{14}N ^{15}N

Radioaktiivsed isotoobid

^{14}C



Luu mineraalne osa ehk hüdroksüapatiit:
 $\text{Ca}_9[(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)_2](\text{OH})_2$



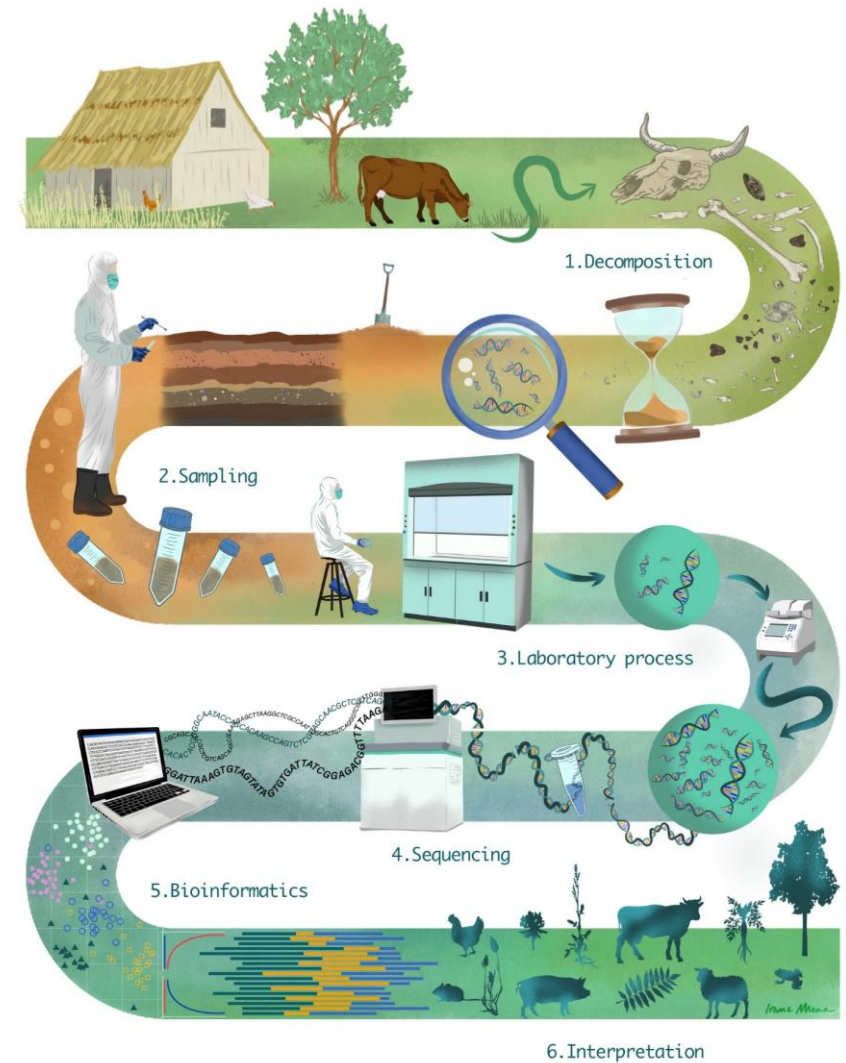
Luu orgaaniline osa ehk kollageen

3. Meetodid

Mis on vana keskkonna-DNA (aeDNA)?

- 1) Vana DNA allikad (aDNA)
- 2) Analüüsi meetodid
- 3) Andmetöötlus ja interpreteerimine

Özdoğan, K.T., Gelabert, P., Hammers, N. et al. (2024). Archaeology meets environmental genomics: implementing sedaDNA in the study of the human past. *Archaeol. Anthropol. Sci.* 16, 108. <https://doi.org/10.1007/s12520-024-01999-2>



Vana DNA (aDNA)

Vana DNA uurimine on toonud muutusi nii arheoloogiasse kui ka paleoökoloogiasse, pakkudes ajas väga kaugele ulatuvaid interpretatsioone.

Edusammud sekveneerimises (järjestusanalüüsis):

Esimene aDNA eraldamine toimus u nelikümmend aastat tagasi: analüüsiti väljasurnud looma kudet.

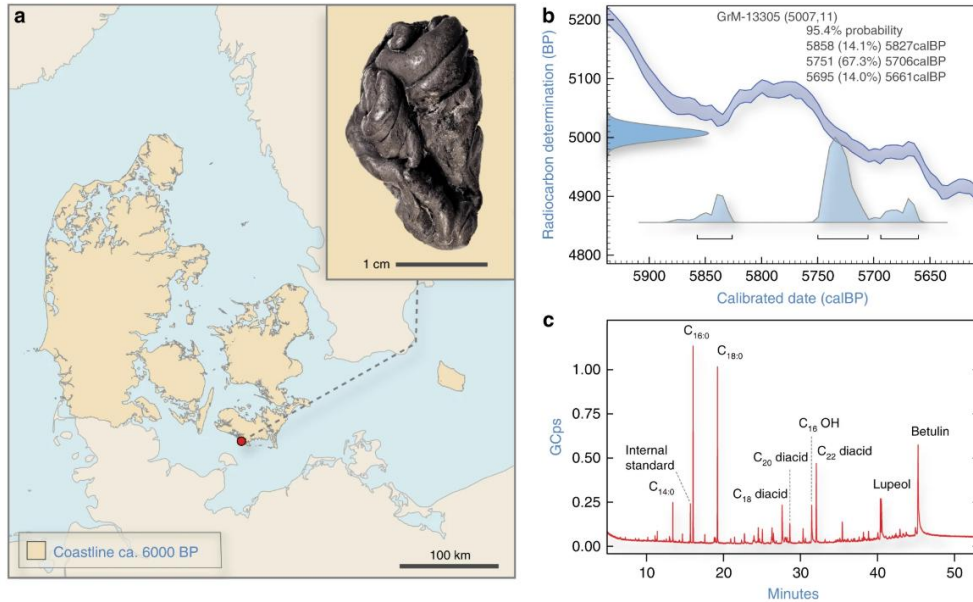
aDNA analüüsid on viinud täieliku sekveneerimiseni:

- väljasurnud loomaliigid (nt mammut);
- muistsed inimpopulatsioonid (nt neandertaalsed ja pärastjääaegsed kütikalur-korilased)
- lubanud klassifitseerida uusi inimeste geneetilisi harusid nagu nt Denisovi inimene

Kaudsed aDNA allikad

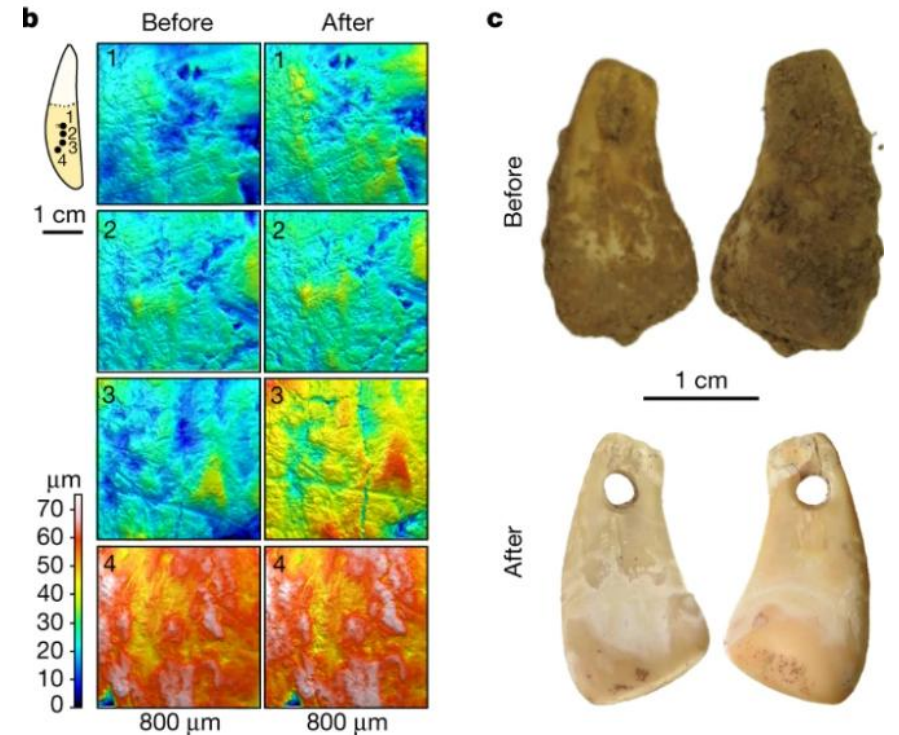
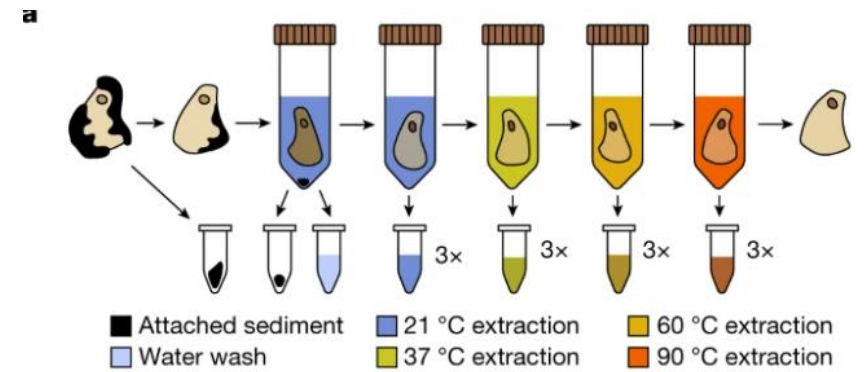
Traditsioonilised allikad: kolju kaljuluu ja hambakivi

Geneetilise materjali jälgi on võimalik leida igasugustest allikatest, mis on kaudselt olnud seotud muistse eluga.



Näritud kasetõrv (u 3900-3700 eKr)

Jensen, T.Z.T., Niemann, J., Iversen, K.H. et al. (2019). A 5700 year-old human genome and oral microbiome from chewed birch pitch. Nat Commun 10, 5520. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13549-9>



Hirve hambast ripats (u 17,000-23,000 eKr)

Essel, E., Zavala, E.I., Schulz-Kornas, E. et al. (2023). Ancient human DNA recovered from a Palaeolithic pendant. Nature 618, 328-332 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06035-2>

Vana sette-DNA (sedaDNA)

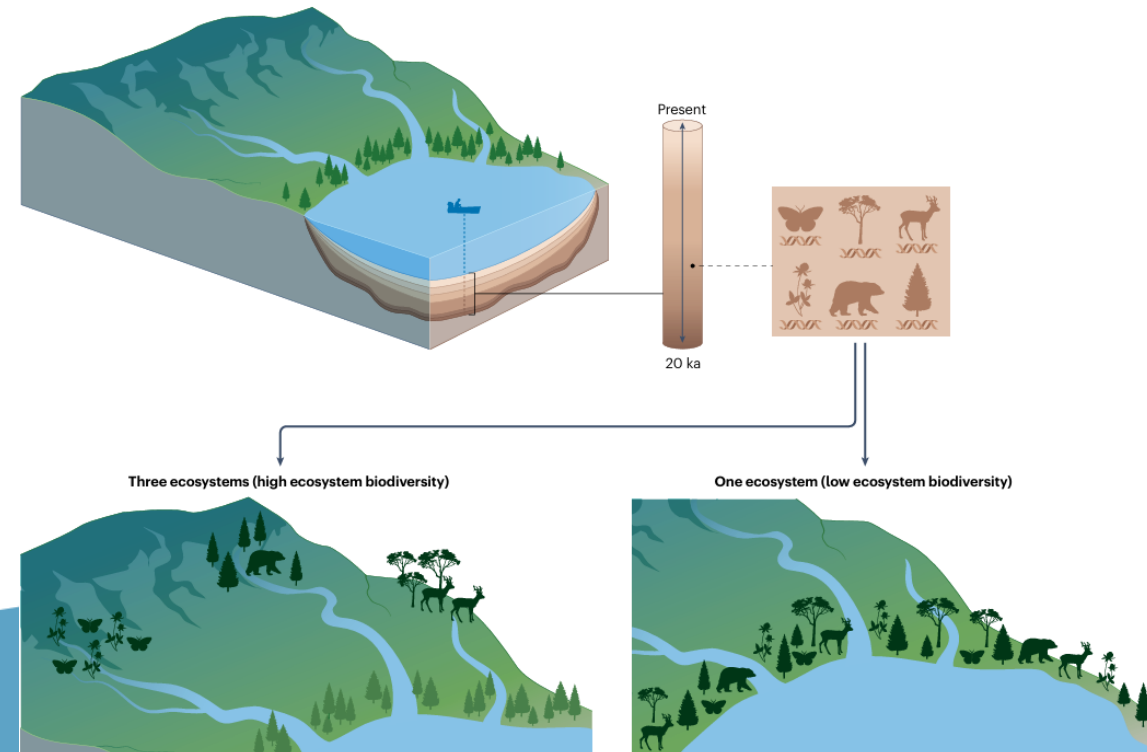
Muld kui vana eDNA hoidla (eraldatud rakud, juuksed, õietolm, jäätmeh).

2 miljoni aasta vanuse ökosüsteemi rekonstrueerimine Põhja-Gröönimaal: Paljastas avatud boreaalse metsa (pappel, kask, elupuu) ja põõsaid, millest paljud olid makrofossiilide ja/või õietolmu abil tuvastamatud.

Kjær, K.H., Winther Pedersen, M., De Sanctis, B. et al. (2022). A 2-million-year-old ecosystem in Greenland uncovered by environmental DNA. Nature 612, 283–291 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05453-y>

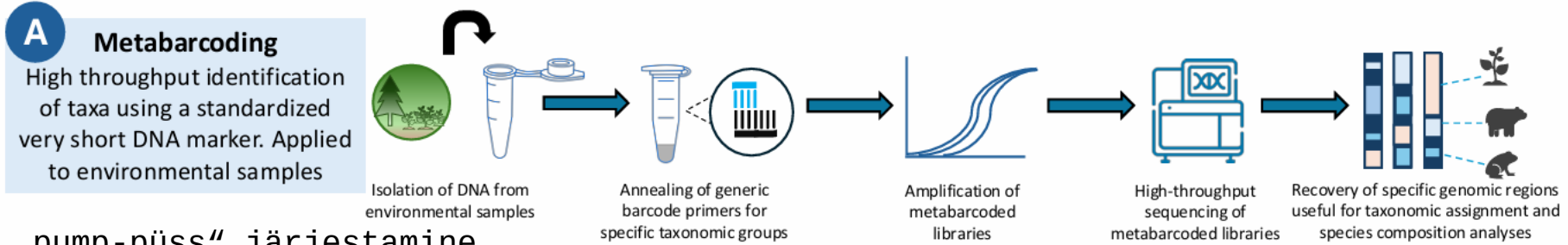
DNA säilivusele pinnases aitavad kaasa: minimaalne füüsiline häiring, madal temperatuur, stabiilne pH ja stabiilne veetase, nt: igikelts, koopad või vettinud keskkonnad.

Lindahl, A., Epp, L.S., Boessenkool, S. et al. (2025). Palaeogenomic inference of biodiversity dynamics across Quaternary timescales. Nat. Rev. Biodivers. 1, 233–247. <https://doi.org/10.1038/s44358-025-00033-0>

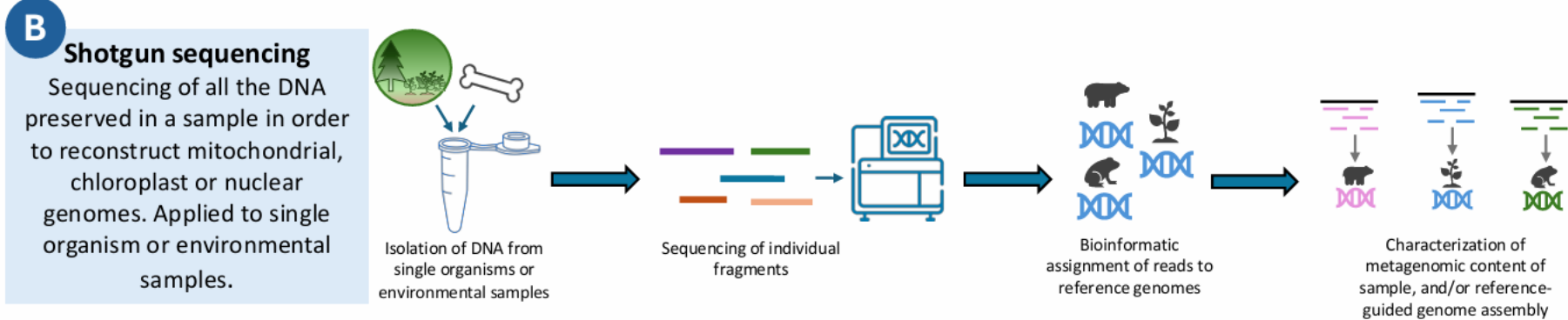


Meetodid DNA eraldamiseks

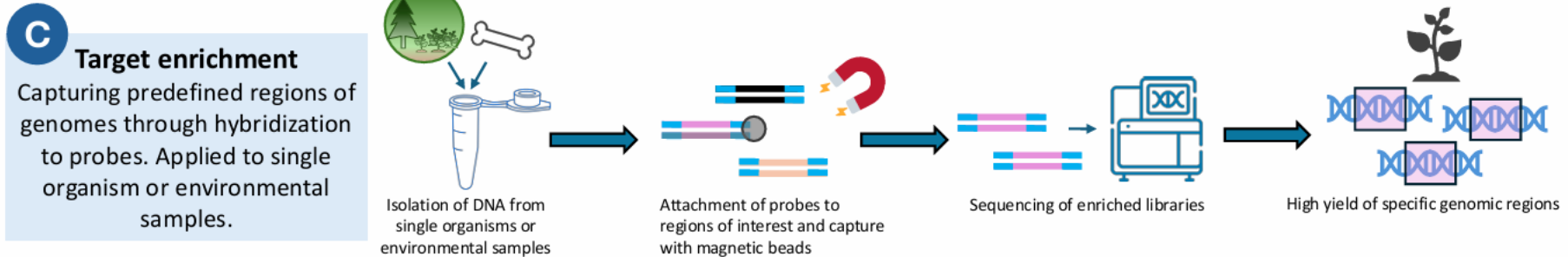
Metatriip koodistamine



„pump-püss“ järjestamine



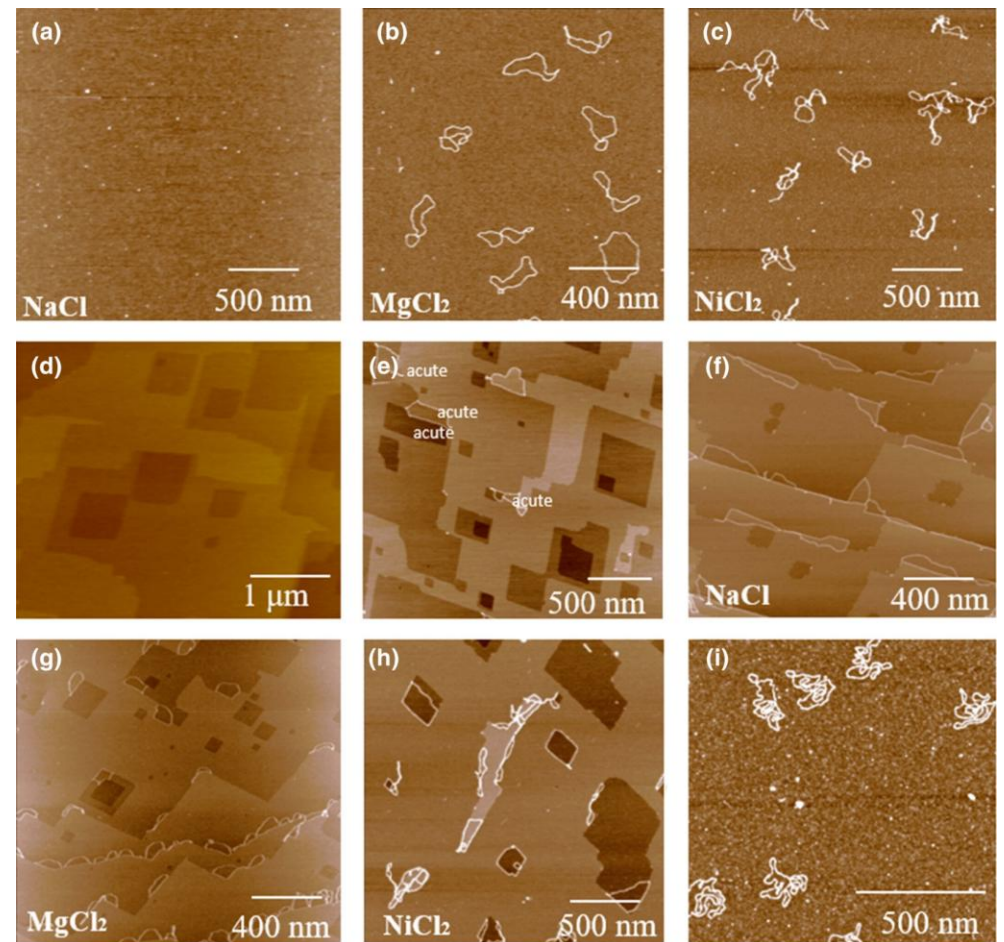
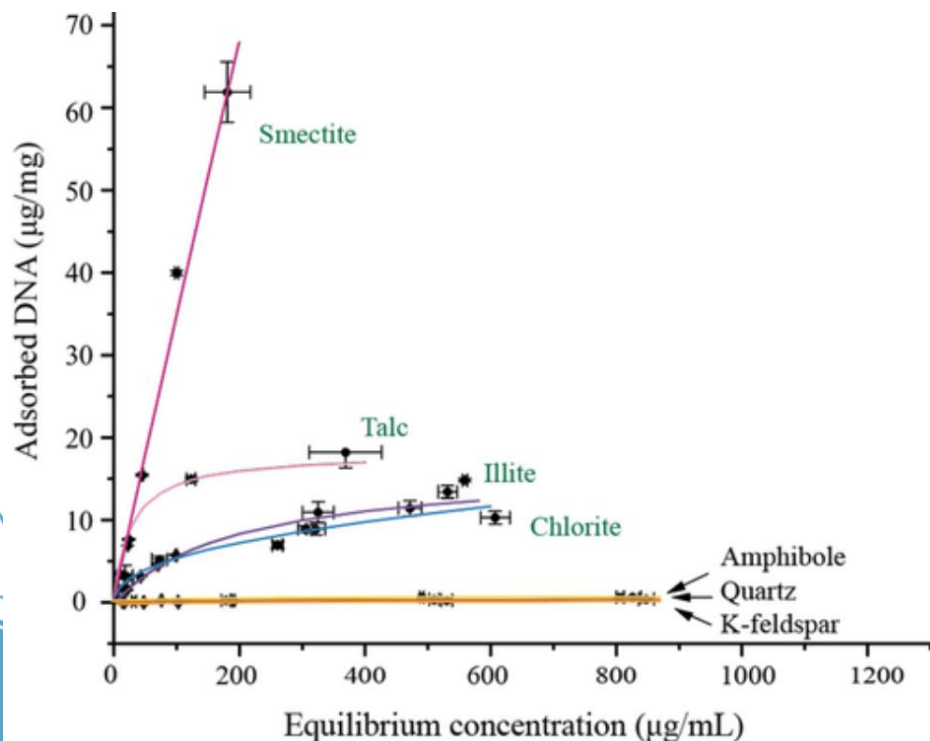
Proovi rikastamine



Meetodid

“Vilgukivi aatomjõumikroskoopia kujutised, mis näitavad adsorbeeritud plasmiidse DNA konformatsiooni erinevate taustioonidega. Plasmidi DNA on nähtav valgena.”

Freeman, C.L., Dieudonné, L., Agbaje, O.B.A. et al. (2023). Survival of environmental DNA in sediments: Mineralogic control on DNA taphonomy. *Environmental DNA* 5, 1691–1705 (2023). <https://doi.org/10.1002/edn3.482>

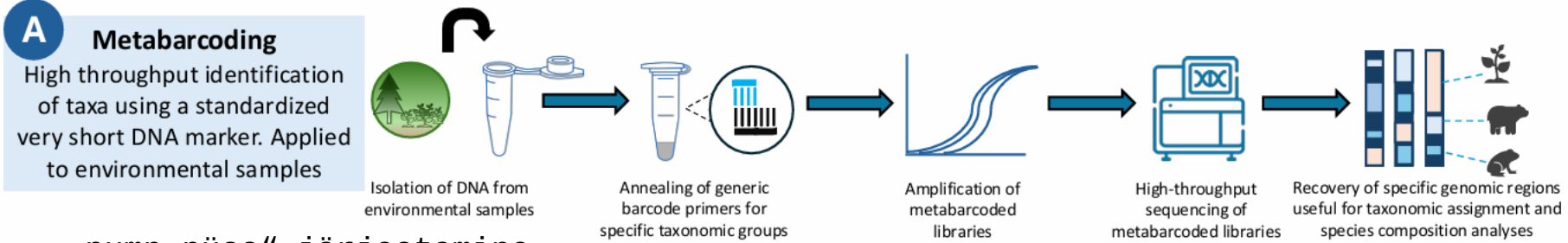


“Kap Københavni kihistu peamiste mineraalide adsorptsioonivõime (Kjær jt, 2022). Adsorbeeritud DNA on näidatud DNA tasakaalu-kontsentratsiooni funktsioonina, st DNA kontsentratsioonina lahuses pärast tasakaalu saavutamist. Määramatus on väljendatud kolme mõõtmise standardhלבena.”

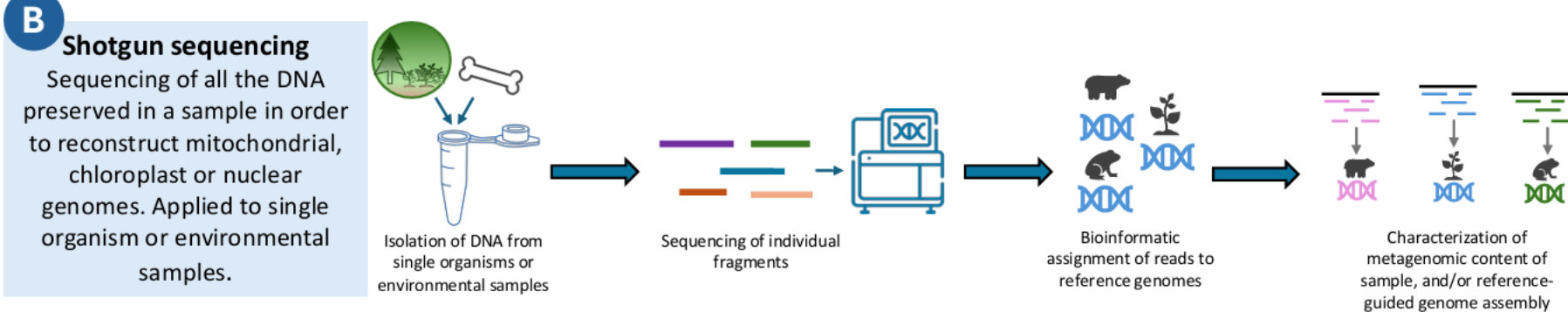
Sand, K.K., Jelavić, S., Kjær, K.H. et al. (2024). Importance of eDNA taphonomy and sediment provenance for robust ecological inference: Insights from interfacial geochemistry. *Environ DNA* 6, e519 (2024). <https://doi.org/10.1002/edn3.519>

Meetodid DNA eraldamiseks

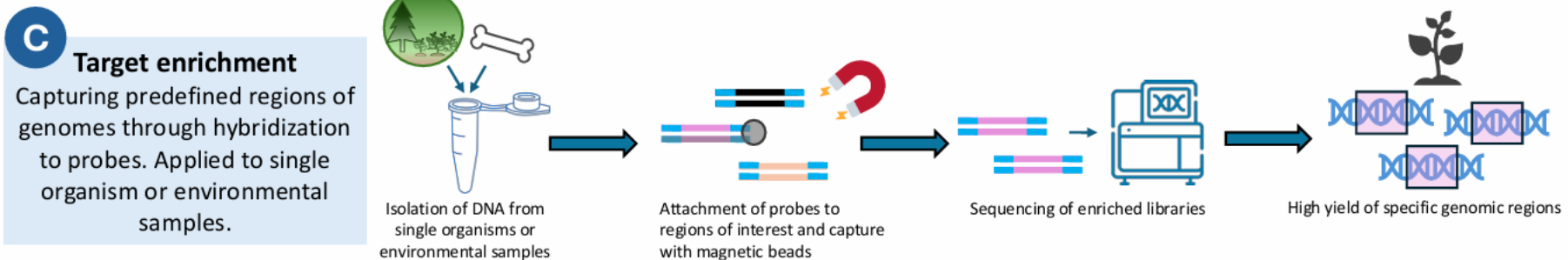
Metatriip koodistamine



„pump-püss“ järjestamine



Proovi rikastamine



Bioinformaatiline analüüs

Kahjustatud aDNA: lagunemine lühikesteks, katkenud fragmentideks.

Kindlaks tegemine: lühikesed fragmendid ja spetsiifiline C -> T deaminatsiooni muster, s.o vana DNA eristamiseks tänapäevasest.

Kahjustuse tüüp

Hydrolüütiline depurinatsioon

Protsess

Puriini aluste (A/G) ja DNA selgroo vahelise sideme purunemine.

Tsütosiini deaminatsioon

Tsütosiini aminorühma kadumine (C -> uratsiil (U))

Tulemus

Lühikesed fragmendid: mediaanpikkus tihti <100 bp.

Deaminatsiooni märke: Sobimatuse korral loeb PCR U tüümiiniks (T), C -> T asendused lühikeste fragmentide otstes.

Bioinformaatiline analüüs

Pärast järjestamist miljoneid lugemisi (tuhandeid GB-sid).

Andmekogumite kontrollimine, filtreerimine ja puhastamine (sekvenerimisvigade, PCR-i duplikaatide ja adapterjärjestuste eemaldamine).

Järjestused on kaardistatud võrdlusandmebaasidesse.

Need tuleb töödelda, et eemaldada saastumine (nt bakteriaalsed järjestused, mis on valesti loomaks liigitatud).

aacgtccaaaggagt
gttacctacgtctaa

tacttctaagtgagtaa
cacgttatcttacttata
tcttaacttataaagg

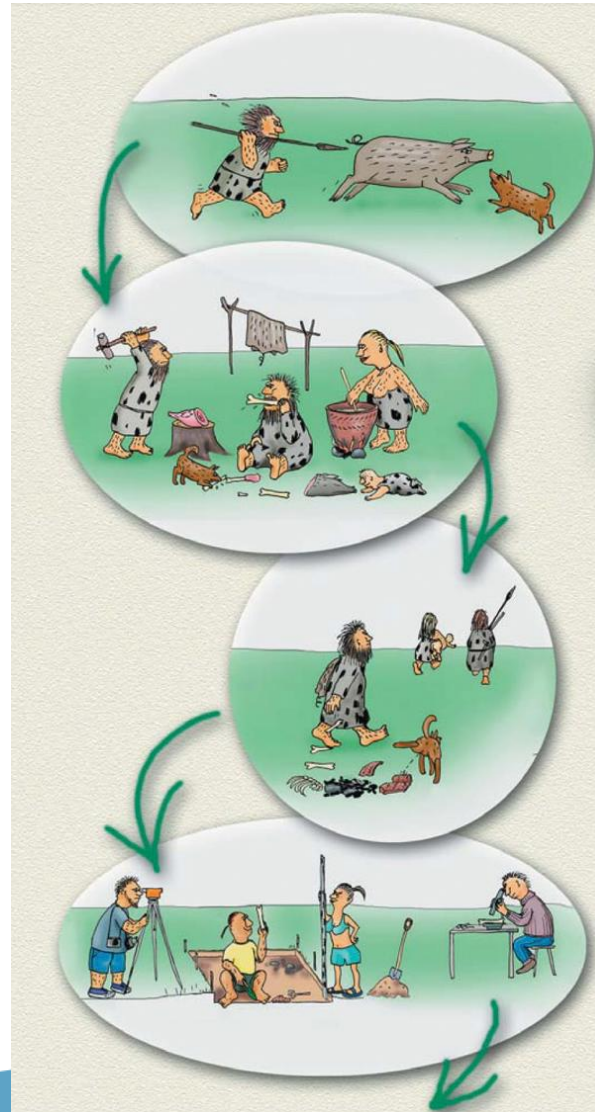
4. Paleofauna ja inimese osast keskkonna, elurikkuse ja kliima rekonstruktsioonides

Paleofauna:

Teatud keskkonnale iseloomulikud liigid (sh selgrootud)

Loomad, keda inimene on jahtinud ja püüdnud

Asustustihedus



Inimene:

Kasutatud materjalid

Põllumajanduse edukus

Asustustihedus

Import/eksport

5. Suurimad paleofauna "jäljed" Maa elurikkuses ja kliimas

Loomade kodustamine (põllumajandus)



Kas Sahara kõrbestumisel oli oma roll ka koduloomade karjatamisel 9000-6000 aastat tagasi? Foto: CNN



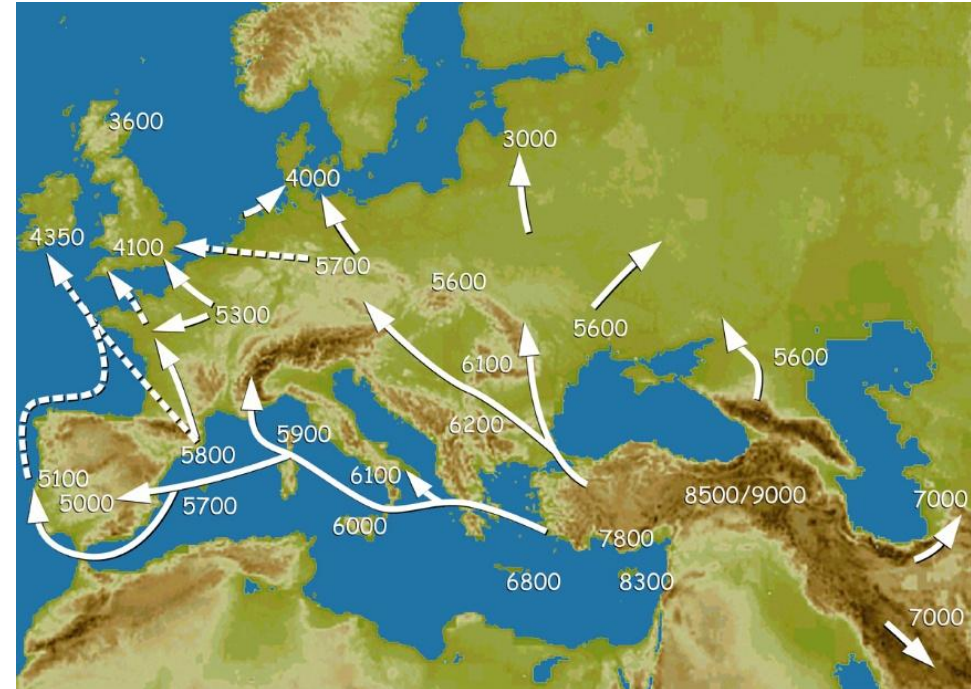
Tallinna loomaaed. Foto: Lembi Lõugas

5. Suurimad paleofauna „jäljed“ Maa elurikkuses ja kliimas

Loomade kodustamine (põllumajandus)



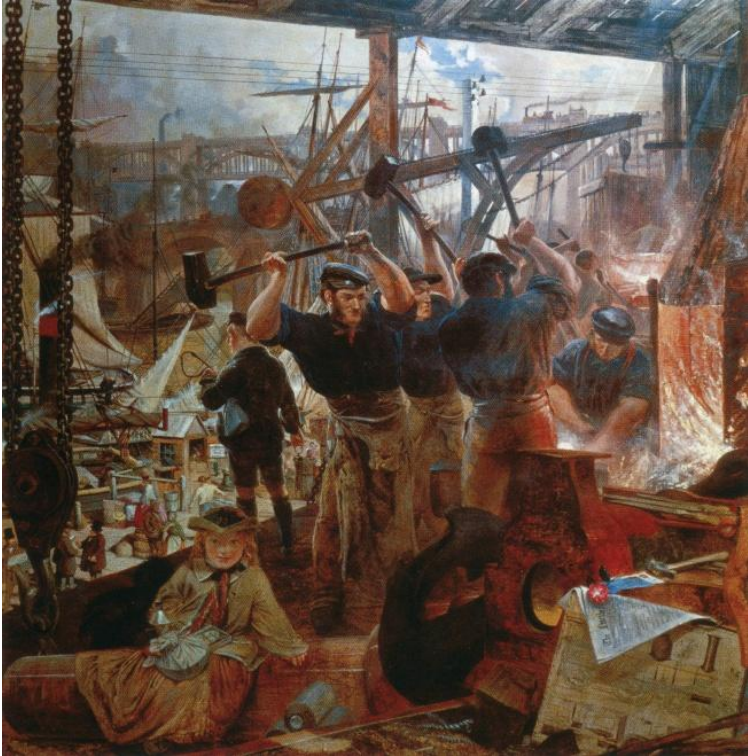
Kitse, lamba, veise ja sea kodustamise keskuseks peetakse Viljaka Poolkuu alasid



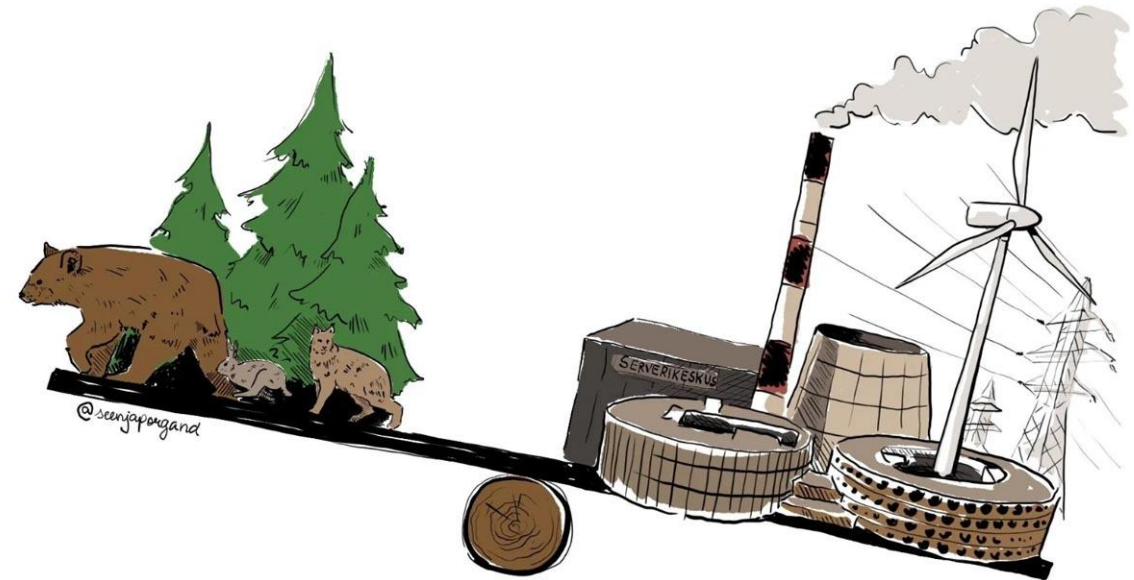
Koduloomad ja kodustamise tehnikad levisid Euroopasse 7000–6000 eKr.

5. Suurimad paleofauna „jäljed“ Maa elurikkuses ja kliimas

Tööstusrevolutsioon

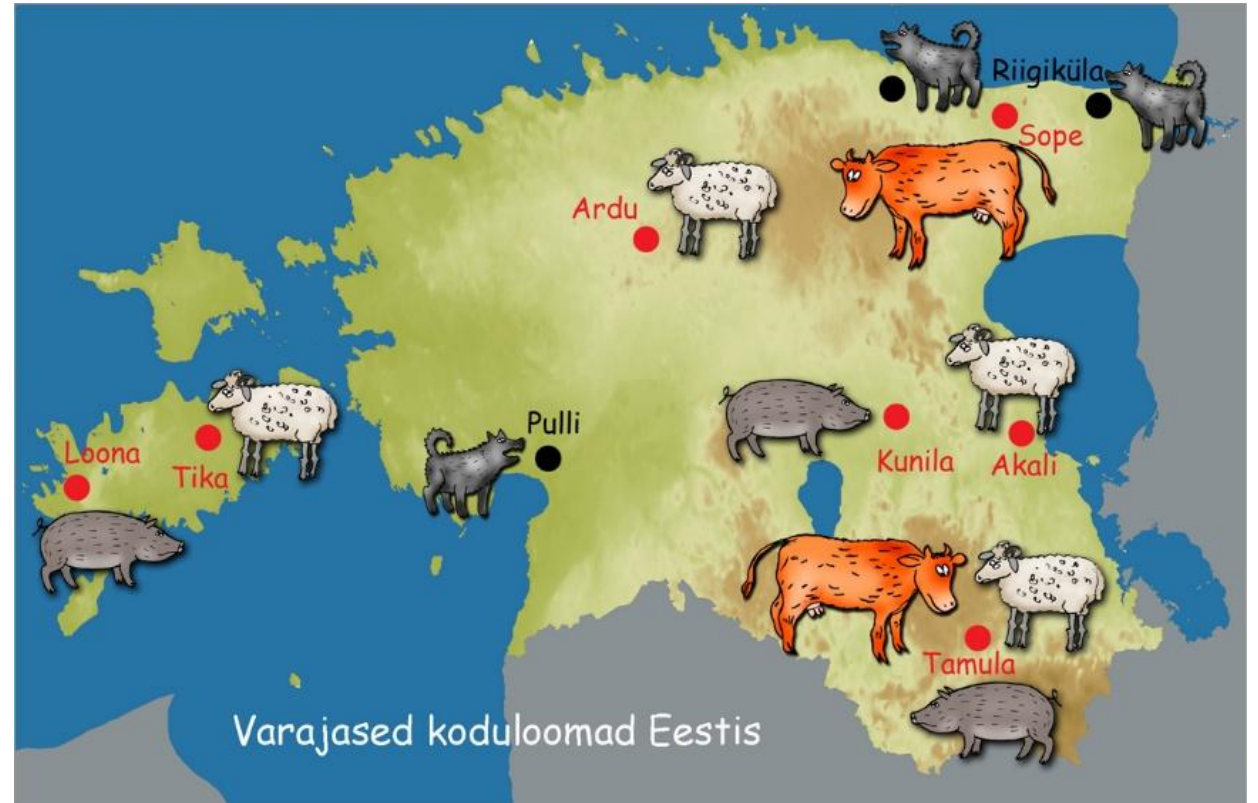
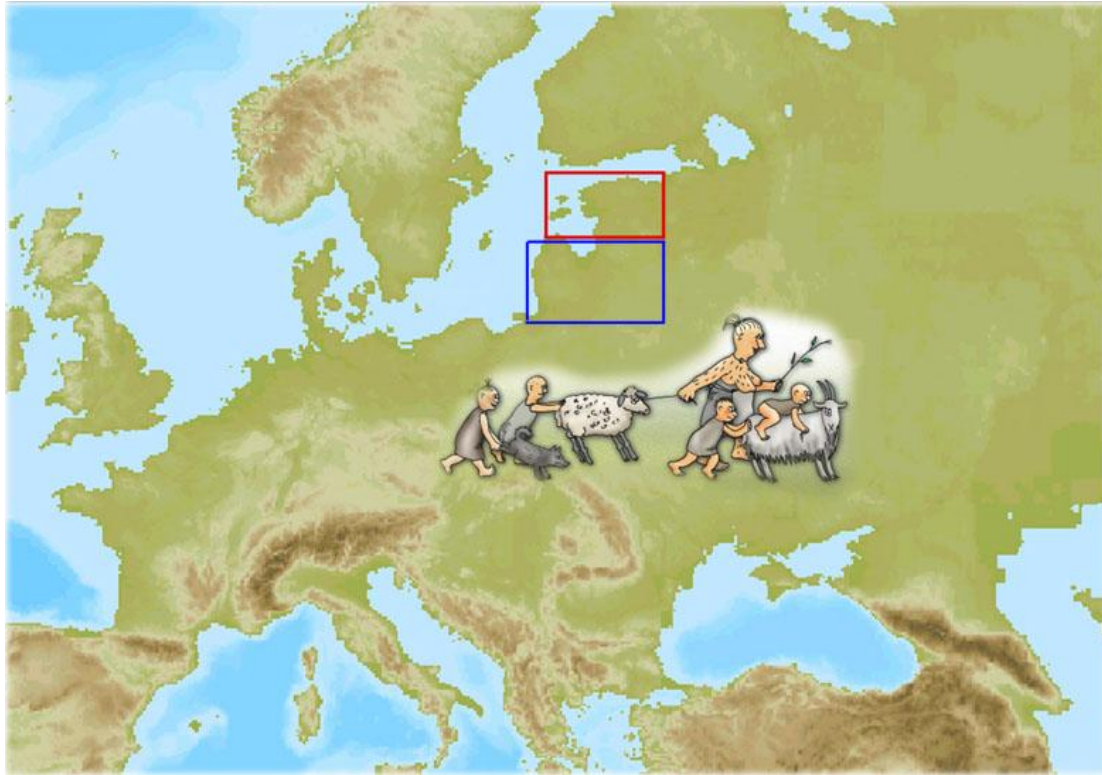


William Bell Scott "Raud ja süsi" 1855-1860

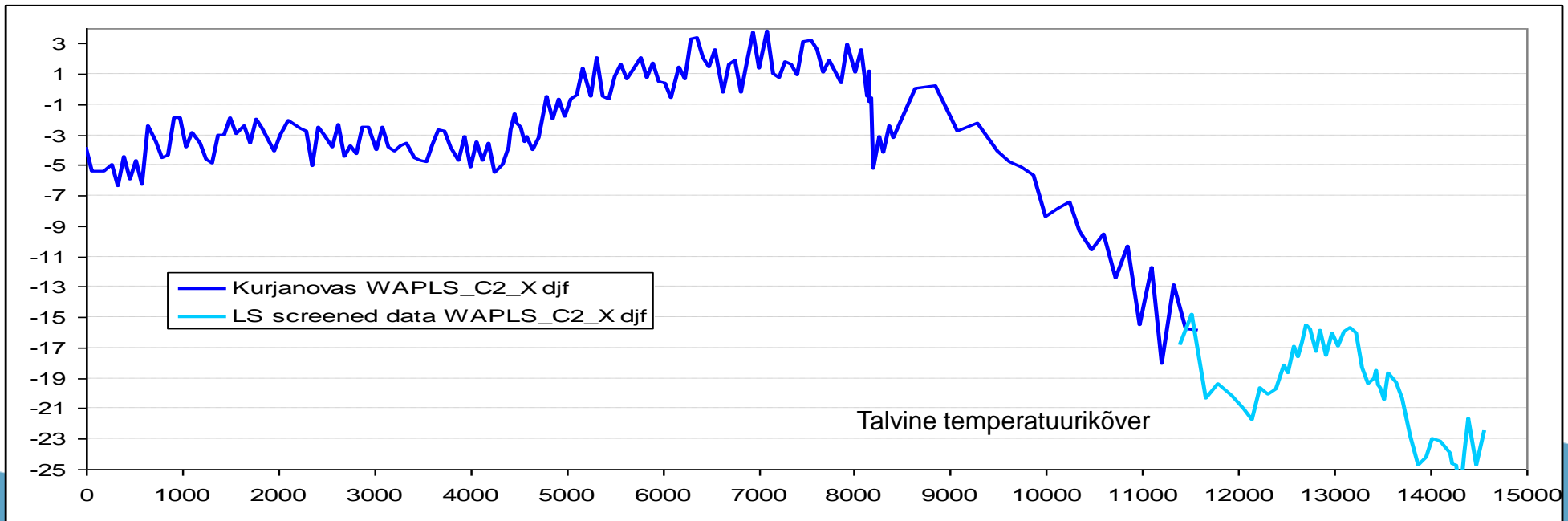
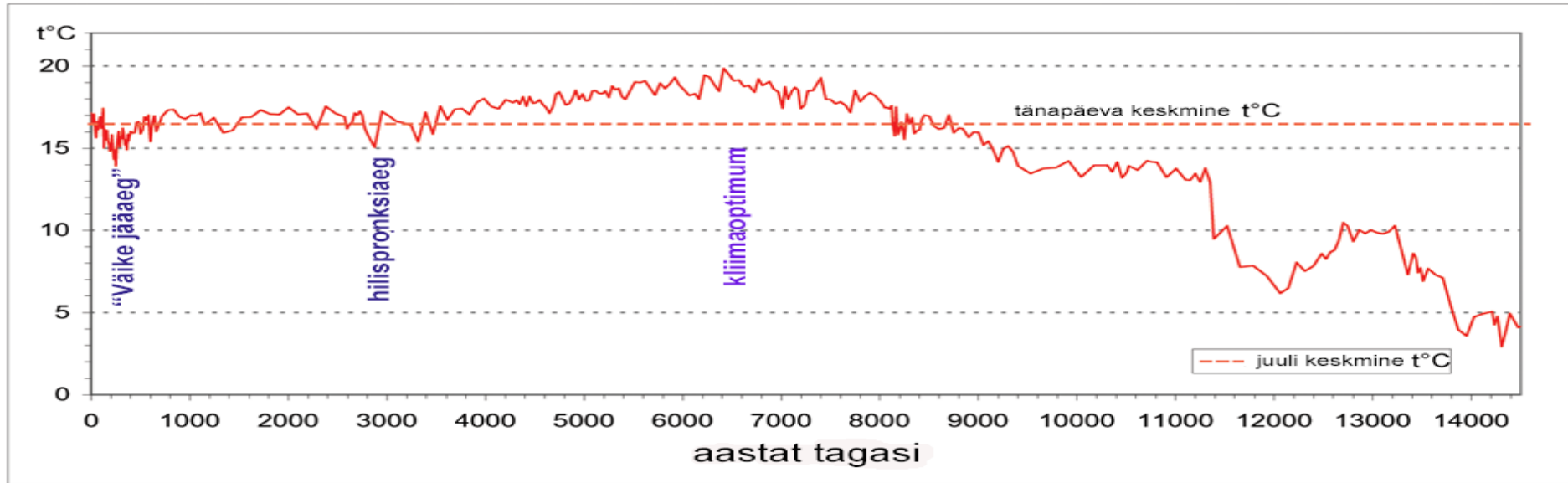


Postimees, 21.02.2025. Torm Parts

6. Eesti näited



6. Eesti näited



7. Kokkuvõtteks

- 1) Ei ole olemas ühe eriala käsitlemist mõistmaks keerulisi seoseid minevikus elanud loomade, inimeste, keskkonna ja kliima vahel - nende protsesside uurimiseks tuleb kasutada väga mitmete erialade meetodeid.
- 2) Maailma ajaloos on kaks väga pöördelist sündmust, mis on loomade-inimeste-keskkonna-kliima seoseid kõige enam mõjutanud: n.o loomade kodustamine ja kodustamise tehnoloogia levimine ning tööstusrevolutsioon, peale mida algas (looma)liikide kiire väljasuremisprotsess.
- 3) Võrreldes Lõuna- ja Kesk-Euroopaga on Eestisse mainitud pöördelised sündmused jõudnud mõningase viivitusega, olgu põhjuseks „äärealal“ paiknemine või kliimaatiliselt ebasobivam keskkond, kuid samas on see säästnud metsikut loodust ulatuslikust hävingust ja piiranud põllumajanduloomade suurt ülekaalu.



AITÄH!



Hiiumaa Arenduskeskus



unesco

Biosfääri programmiala



KLIIMAMINISTEERIUM



Kaasrahastanud
Euroopa Liit



Eesti
tuleviku heaks