

Datovací metody: přehled metod

(M. Walker 2004: Quaternary dating methods)

1. Radiometrické datovací metody:

- Radiokarbonové datování (radioaktivní nestabilní izotop ^{14}C , dosah ca 50 000 let)
- Datování pomocí jiných radioaktivních izotopů: s *dlouhým poločasem rozpadu* (argonové řady pro datování vulkanitů, uranové řady pro karbonáty) pro vyšší stáří a s *krátkým poločasem rozpadu* ^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{32}Si pro stáří několik desítek let
- *Luminiscenční metody* (elektrony se uvolňují teplem nebo světlem), „*Electron spin resonance dating*“ (chycené elektrony se uvolňují z krystalické mřížky pomocí magnetického působení)

Opticky stimulovaná luminiscence (OSL): použito modré světlo pro datování zrn písku



2. Datování využívající roční přírůstky tzv. „Annually banded record“ neboli přírůstkové metody (Incremental methods):

- *dendrochronologie* (letokruhy)
- *chronologie varv* (varvy jsou jednotlivé vrstvičky sedimentu odpovídající jednotlivým letům – jezerní nebo mořské): podle varv z jezera ve Švýcarsku spočítáno LGM poměrně přesně (16-20 tis. let BP)
- *lichenometrie* (pravidelné přírůstání stélky lišejníků),
- Roční vrstevnatost ledovce, krápníků nebo korálů.

3. Metody věkové ekvivalence „Age equivalence“ : nemohou být sami o sobě, ale využívají porovnání s datovanými vrstvami jinde

- *chronostratigrafie izotopů kyslíků* v hlubokomořských sedimentech
- *tephrachronologie* (vrstvičky sopečného popela)
- *paleomagnetismus*
- *paleopůdy*

4. Relativní datovací metody: něco je starší nebo mladší , používají se hlavně v geologických vědách a jsou základem stratigrafie. Po srovnání s nějakým referenčním vzorkem datovaným např. ^{14}C je možné určit stáří (např. míra zvětrávání hornin)



Datovací metody: stanovení stáří Země a jednotlivých geologických epoch

Stanovení stáří Země – pomohl vynález radioaktivity

- Do té doby se vycházelo ze Starého Zákona a předpokládalo se stáří Země kolem 6000 před současností
Např. 1654 arcibiskup James Ussher na základě studia Starého Zákona publikoval práci, podle které Země vznikla v sobotu 23. října 4004 BC a následující pátek byl stvořen člověk 😊
- 19. st, John Joly, spočítal obsah solí sodíku ve světových oceánech a každoroční přísun sodíku erozí hornin a došel ke stáří Země 100 milionů let.
- Kolem roku 1880 angl. přírodovědec A.R. Wallace odhadoval stáří Země na 400 milionů let
- Po objevu radioaktivity, už první výpočty na základě množství radia v zemském plášti ukázaly překvapivě vysoký věk planety v řádu miliard let
- roku 1906 E. Rutherford na základě radioaktivního rozpadu uranu odhadl stáří Země na několik miliard

1. Radiometrické datovací metody: Radiokarbonové datování

- První metody pro datování kvartérního materiálu se vyvinuly po **objevu radioaktivity**: Becquerell (1896, záření uranu) a M. Sklodowska-Curie (polonium a radium, 1898, záření nazvala radioaktivitou: schopnost atomu přeměnit se na jiný a přitom se uvolňuje záření)

Atomové jádro a radioaktivita

- atomové (=protonové) číslo (počet protonů), hmotnostní číslo (počet neutronů a protonů v jádře), elektrony (záporný náboj, obal) např. ${}_{92}^{238}\text{U}$
- Prvky se navzájem liší atomovým číslem, tzn. v počtu protonů v jádře. Pokud se liší v neutronech, nazýváme je **izotopy** (např. kyslík s atomovým číslem 16 může mít 18 nebo 16 neutronů: ${}^{18}\text{O}$, ${}^{16}\text{O}$). Mají stejné chemické vlastnosti (počet elektronů zůstává stejný), ale jinou hmotnost. Jednotlivé izotopy prvků se nazývají **nuklidy**.
- Pokud má jádro moc nebo málo neutronů, stává se nestabilní a dochází ke spontánní emisi částic nebo energie. Takovým izotopům říkáme **radioaktivní nuklidy**.
- Tři typy emise během radioaktivního rozpadu: a) **alfa částice (jádro helia)** se skládá ze 2 protonů a 2 neutronů a je kladně nabitá (při kolizi s okolními atomy si doplní elektrony a vytvoří helium), např. uran, radon, radium a thorium jsou α zářiči b) **beta částice** se skládá z elektronů a je nabitá záporně (např. ${}^{90}\text{Sr}$), c) **gamma částice** – elektromagnetické záření bez náboje, tvoří kosmické záření a doprovází radioaktivní rozpad (např. ${}^{137}\text{Cs}$), + d) **záchyt elektronu** – proton v jádře zachytí elektron k jádru nejbližší a přemění se na neutron za vzniku prvku o jedno protonové číslo menší. Tato přeměna je doprovázena charakteristickým rentgenovým (X) a gama zářením.

• **Willard F. Libby** (1908-1980), americký chemik – **objev radiokarbonových hodin** (1960 za to dostal Nobelovu cenu)

• Protony kosmických paprsků vystřelují z jader ve svrchní atmosféře neutrony, které zase bombardují atomy ^{14}N (hlavní složka atmosféry) a vzniká tak **nestabilní radioaktivní ^{14}C izotop** (M. Kamen a S. Ruben ho poprvé izolovali v laboratoři)

• ^{14}N (7 protonů+7 neutronů) + neutron = ^{14}C (6 protonů + 8 neutronů) + proton

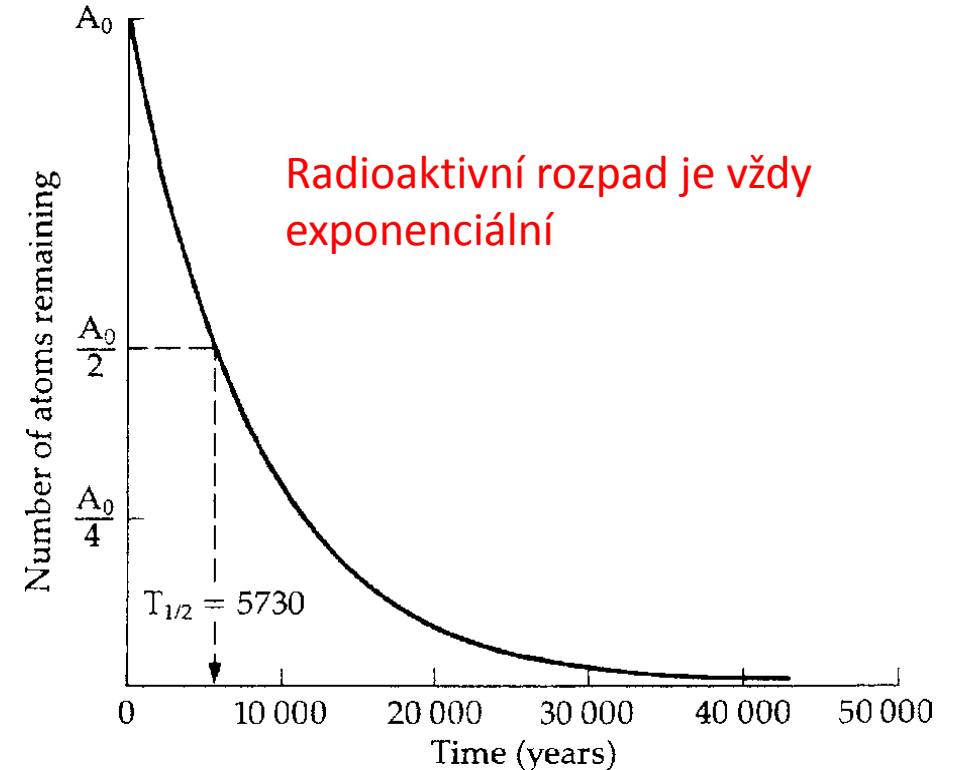
poměr nestabilního ^{14}C ku stabilním ^{12}C a ^{13}C je v atmosféře konstantní (ca 1:1 bilionu),

- tento poměr se ukládá do živých tkání (producenti asimilují, konzumenti konzumují producenty)

- po smrti (zpuštění hodin) se nestabilní ^{14}C rozpadá na ^{14}N (vyzáření beta částic)

– **za 5730 let** je koncentrace poloviční (poločas rozpadu)

- omezení na ca 45,000 let, 8 poločasů rozpadu – ještě měřitelná koncentrace ^{14}C



- Radiokarbonové datování je jedno z nejvýznamnějších pro posledních 50 000 let, především pro biotická proxy
- **Co lze datovat:** vše co má uhlík - nejčastěji se datuje dřevo (ale dřevní elementy odumírají ještě za života stromu !!), rašelina, organické jezerní sedimenty, zbytky rostlin (semena), uhlíky, ulity měkkýšů a korály. Více problematické jsou kosti a půda. Radiokarbonová data lze získat i z netradičních materiálů jako je oblečení, výrobky z kovů nebo fosilní pigment.
- **Nejčastější metody:**
 - *Konvenční metody* („decay counting“) stanovují počet radioaktivních přeměn ve vzorku za časovou jednotku, tj. měří se emise beta paprsků u ^{14}C atomů za určitý čas
 - *Accelerator mass spectrometry (AMS):* Atomový hmotnostní spektrometr využívá elektromagnetického urychlovače částic k přímému počítání jednotlivých atomů („direct counting“) s hmotovými čísly 12, 13 a 14, které jsou pak přepočítány na aktivitu ^{14}C .
Výhoda: stačí velice málo materiálu – jednotky až stovky mg
(např. 1 hořčičné semínko, pylový koncentrát, vlákna, uhlíkaté příměsi v keramice)
- Existuje celá řada laboratoří, v Polsku (Poznaň), v Holandsku (Groningen), Anglie (Londýn), Maďarsko (Debrecen), USA (např. University of Georgia)



Ale: ukázalo se, že původní předpoklad, že relativní obsah izotopu ^{14}C v atmosféře je dlouhodobě stabilní se nepotvrdil.

Důvody: Proměnlivá aktivita slunce a změny v magnetickém poli

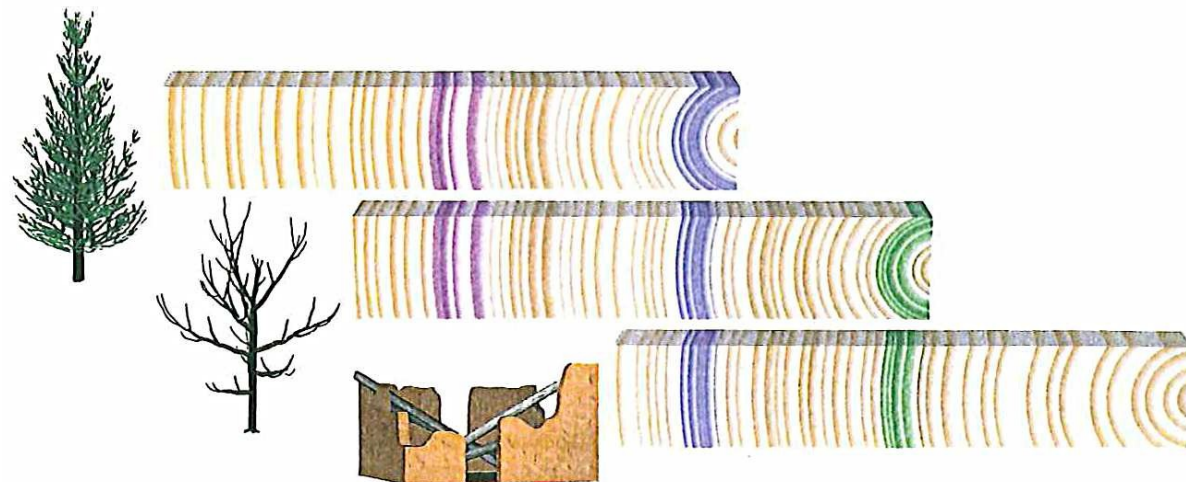
Důsledek: zjištěný (nekalibrovaný) věk není absolutní, nutná kalibrace - nekalibrovaná ^{14}C data jsou vždy znatelně mladší než absolutní

Řešení: zavedení kalibrace neboli korekce časových údajů na podkladě křivky popisující vývoj atmosférických ^{14}C koncentrací během minulosti. První takovou křivku se podařilo získat radiokarbonovým datováním jednotlivých letokruhů dlouhověkých borovic (*Pinus longaeva = aristata*) z jz. USA – dožívají se až 5 000 let.

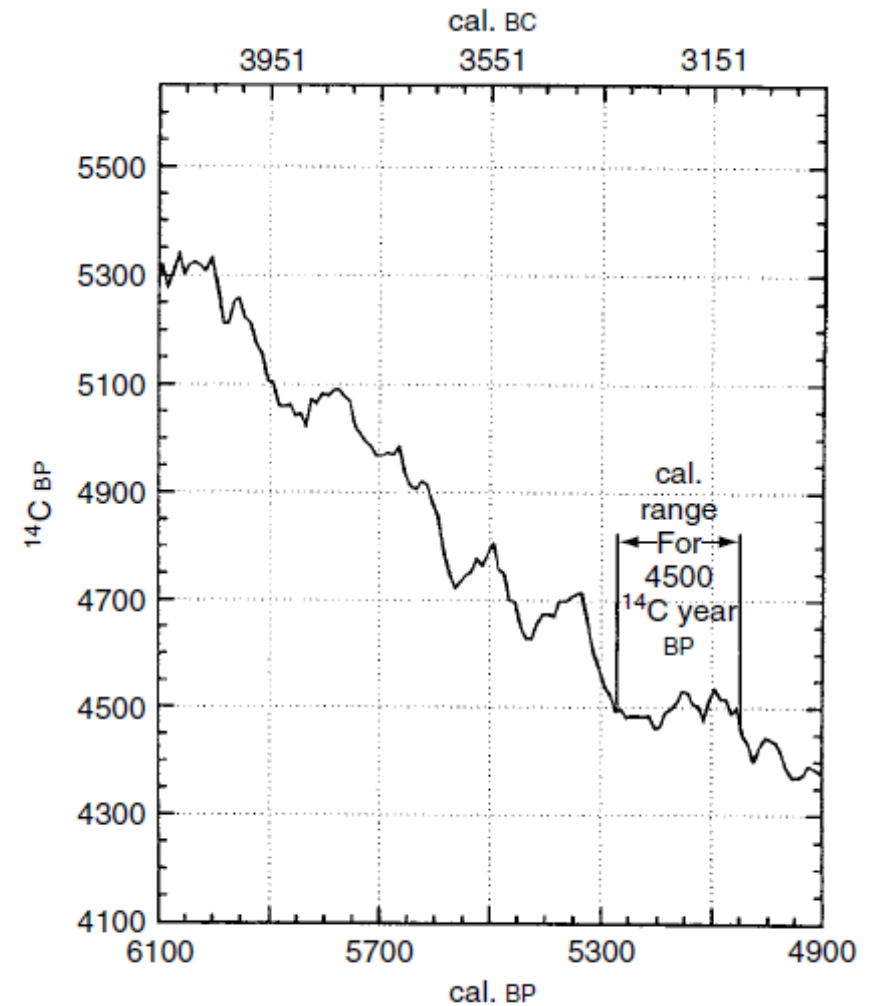
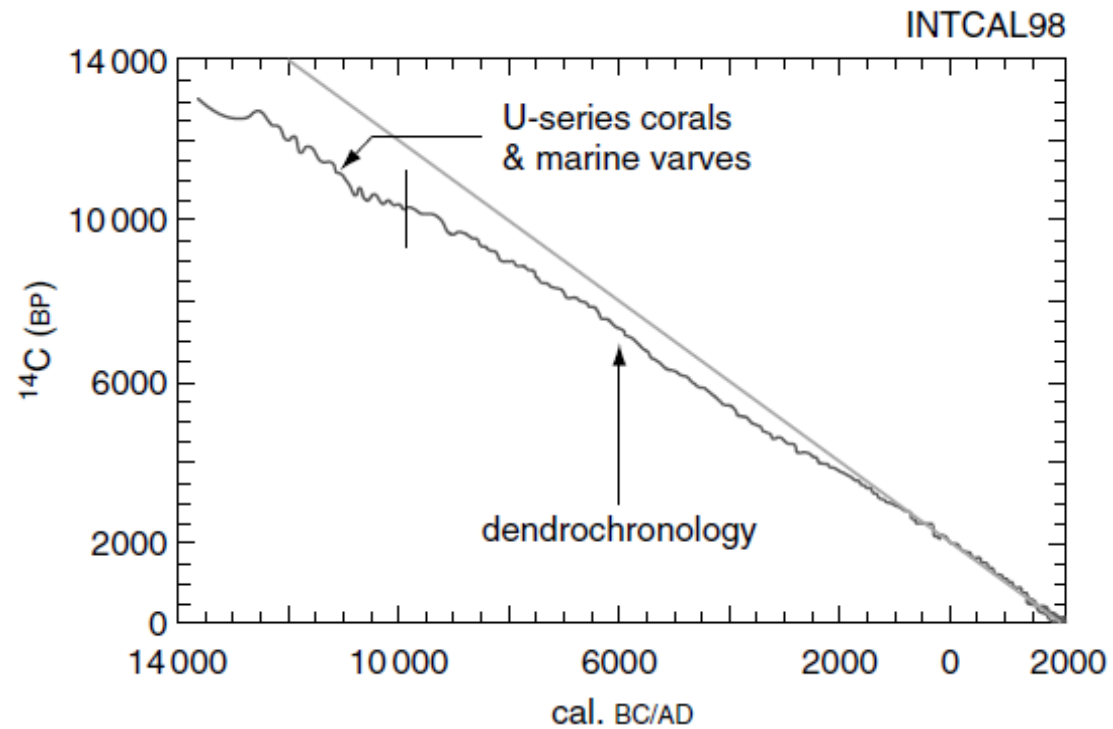
Napojením na fosilní kmeny z Irska a Německa – souvislá křivka do 11,300 BP (IntCal98; Stuiver and Van der Plicht 1998).

Novější kalibrační křivka (IntCal04) byla konstruována do 26,000 BP a využívá párová radiokarbonová a uranová data z korálů a foraminifer (Reimer et al. 2004). Program Oxcal <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/OxCal.html>

Nejnovější je křivka IntCal13 a sahá 50 000 let zpátky.



Kalibrační křivka IntCal98



Další možné komplikace a chyby radiokarbonového datování:

- *Kontaminace mladším materiálem:*

- hlubší vrstvy mohou být kontaminovány mladšími kořeny nebo huminovými kyselinami (problém datování vzorků sedimentů tzv. „bulk“)

- bioturbace (půdními organismy, ryby v případě jezer atd.), růst kořenů

Relativně malá kontaminace recentním uhlíkem způsobí velkou chybu (výrazně vyšší aktivita radiokarbonu ^{14}C v současnosti oproti starým vzorkům). Čím starší vzorek, tím větší chyba. Např.: 1% kontaminace recentního karbonu do 17 tisíc let starého vzorku sníží stáří o 600 let.

- *Kontaminace starším uhlíkem* – chyby při datování vápnitých jezerních sedimentů (starý uhlík z uhličitanu vápenatého)

tzv. „hard water error“ vodní makrofyta přijímají CO_2 nejenom ze vzduchu, ale i z vody, kde je rozpuštěný starý uhlík. Práce Grimm et al. 2009 – běžná chyba u jezer 500-2000.

- *Kontaminace při odebírání (vrtání) v terénu*

- *Kontaminace při skladování vzorků na datování v laboratoři (růst hub-recentní uhlík)*

NORPEC (Norwegian Past Environment & Climate project) sampling protocol for AMS radiocarbon dating by Hillary. H. Birks & A.F. Lotter

Pro AMS je potřeba jen malé množství materiálu – *výhoda*: přesnější datování (jednotlivá semínka) x *nevýhoda*: i malá kontaminace může hodně ovlivnit výsledné datování

Hlavní zásady:

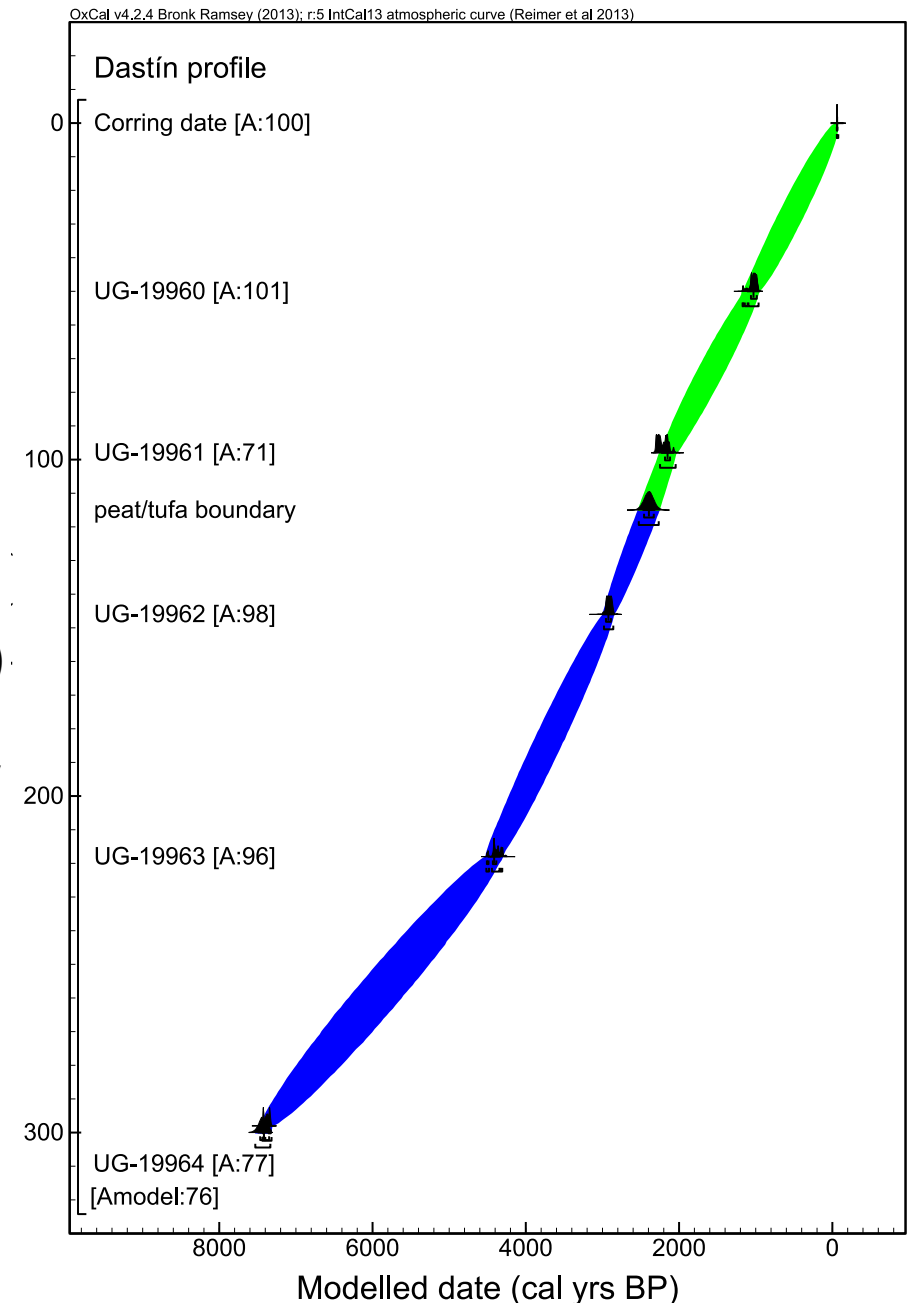
- Vzorky sedimentu uchovávat v chladu a co nejdříve zpracovat nebo na delší dobu zamrazit
- Sediment vyplavit a vybrat vhodné makrozbytky
- Vybrané makrozbytky očistit od všech nečistot ulpívajících na povrchu (pozor na vlákna: vlna dělá vzorky mladší, umělá vlákna zase starší)
- Dobře vysušit bez kontaktu s papírem (na skleněné petričce)
- Dobře vysušené uzavřít do epruvetky a dát do ledničky a co nejdříve poslat, případně hluboko zmrazit

Protokol pro laboratoř ke každému vzorku: název lokality, souřadnice, ID vrtu, datum vrtání, hloubka vzorku, jeho ID, předpokládané stáří, typ materiálu použitý pro datování (např. jehlice smrku, semena ostřice atd.), datum přípravy vzorku

Depth-age model

- Slouží k odečtu stáří jednotlivých vrstev profilů a ke stanovení rychlosti sedimentace v jednotlivých obdobích
- Např. program Oxcal k modelování depth-age křivky (<https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal/OxCal.html>)
- File – New – Insert P_sequence (nastavit: k_0 , Interpolation, $\log_{10}(k/k_0)$, pokud pravidelná sedimentace, nastavuje se 1; možnost nastavit flexibilní $k : U (-2,+2)$ když se v profilu mění rychlost sedimentace)
- Insert Boundary (bottom) – Modifiers – Position – z (hloubka v cm)
- Insert R_date (radiokarbonová nekalibrovaná data z laboratoře s chybou) – Modifiers – Position – z (hloubka v cm)
- Insert C_date (datum odběru) – Modifiers – Position – z (hloubka v cm)
- Insert Boundary (horní hranice) - ukončení
- File – Save as (uložit) a RUN (modrá šipka vpravo)
- Různá nastavení ve „Format“

UG-19960,1130	30,50 cm
UG-19961,2190	30,98 cm
Boundary (peat/CaCO3),	115 cm
UG-19962,2810	25,146 cm
UG-19963,3930	25,218 cm
UG-19964,6490	25, 298 cm



1. Radiometrické datovací metody: Datování pomocí izotopů argonu

1. Potassium-argon datování ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$)

- Vyvinuto 1960
- Založeno na rozpadu radioaktivního izotopu $^{40}_{19}\text{K}$ (poločas rozpadu 1250 mil let) relativně ke stabilnímu $^{40}_{18}\text{Ar}$ (plyn) (produkt rozpadu, záchyt elektronu)
- Využívá se k datování vyvřelých hornin (nejstarší horniny na Zemi)
- Pro kvartér jde použít pouze pro vulkanické horniny starší 100 000 let (malá přesnost)

2. Argon-argon datování ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)

- Přesnější, proto vhodná i pro mladší vzorky (10 000 let a starší)

Příklady využití:

- Hlavní příspěvek tohoto typu datování bylo datování lávy a vulkanických materiálů spojených s nálezy raných hominidů v Africe (ca 2.4 mil let)
- Vývoj ledovcových chronologií pomocí datování vrstviček sopečného popela (tephry), které jsou uzavřené v ledu (Yukon, Patagonie)
- Datování sopečných událostí



Figure 2 A lava flow on Etna that would provide a record of magnetic field direction and that could be dated by the potassium-argon method.

1. Radiometrické datovací metody: Datování pomocí izotopových řad uranu a thoria

- Využití od stovek let po 350 000 let při použití spektrometrie alfa částic a po 500 000 let při použití hmotnostní spektrometrie
- Využití pro vápnité sedimenty (krápníky, travertiny) a organismy vytvářející vápenaté schránky (měkkýši, koráli)
- Řady rozpadu začínající ^{238}U a ^{235}U a ^{232}Th
- Mateřské izotopy stabilnější než dceřiné (delší poločas rozpadu), rozpad až do equilibria
- 2 metody založená na separaci produktů rozpadu: „daughter deficient“ (DD nedostatek) a „daughter excess“ (DE nadbytek)
- DD: měří se poměr $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$: rozpuštěný ^{234}U zabudovávají do schránek, kde se začíná rozkládat na ^{230}Th (to není rozpustné, nepřijímají do schránek). Podobně protactinium $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$.
- DE: produkty rozpadu ^{230}Th a ^{231}Pa se uvolňují a klesají do sedimentu na dno. Stáří sedimentů lze stanovit měřením rozpadu Th a Pa v profilu

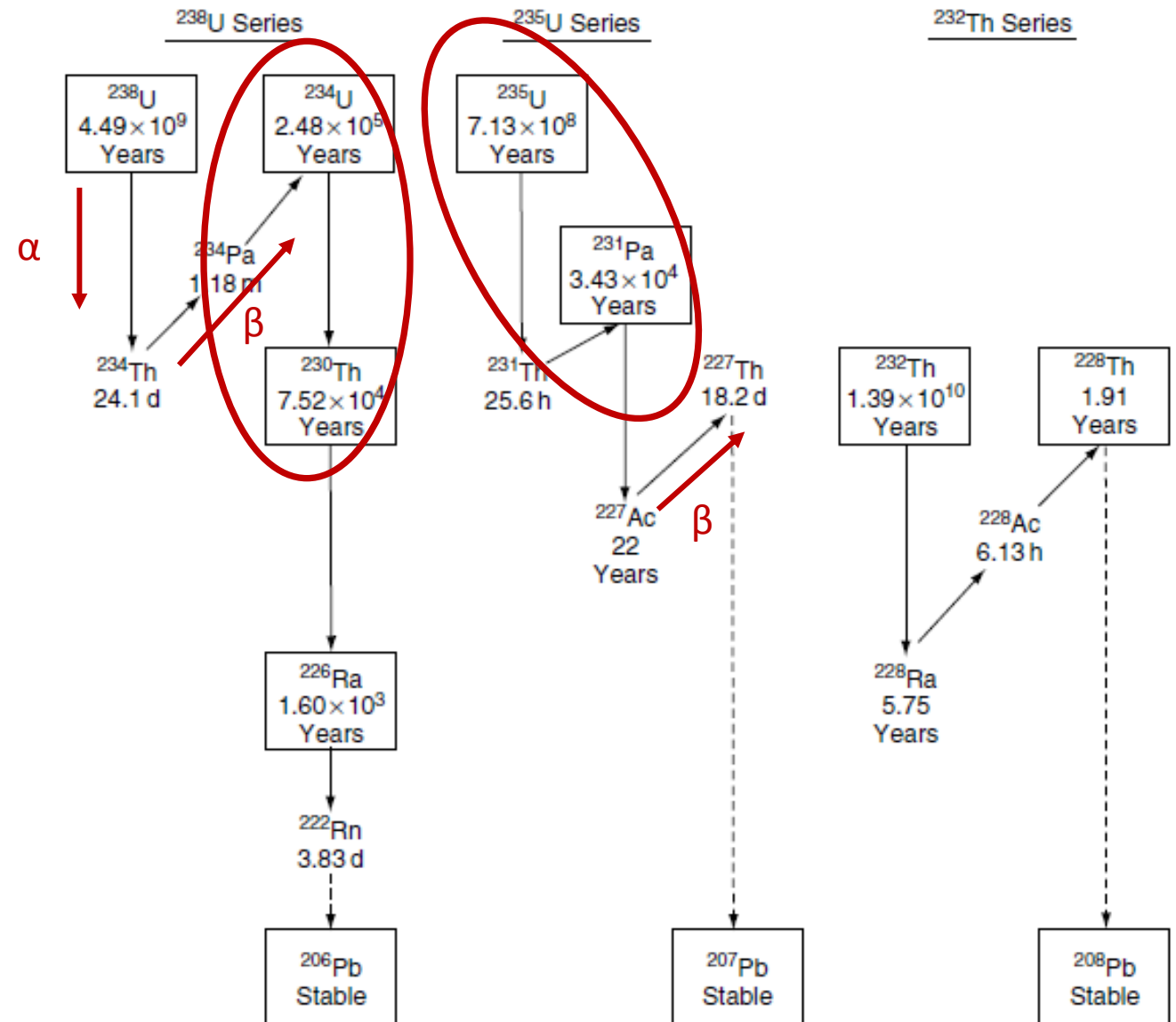


Table 3.1 Reliability/unreliability of uranium-series dates for terrestrial materials arising from deviations from closed-system behaviour and contamination by ^{230}Th and ^{234}U from detrital material (after Smart, 1991a)

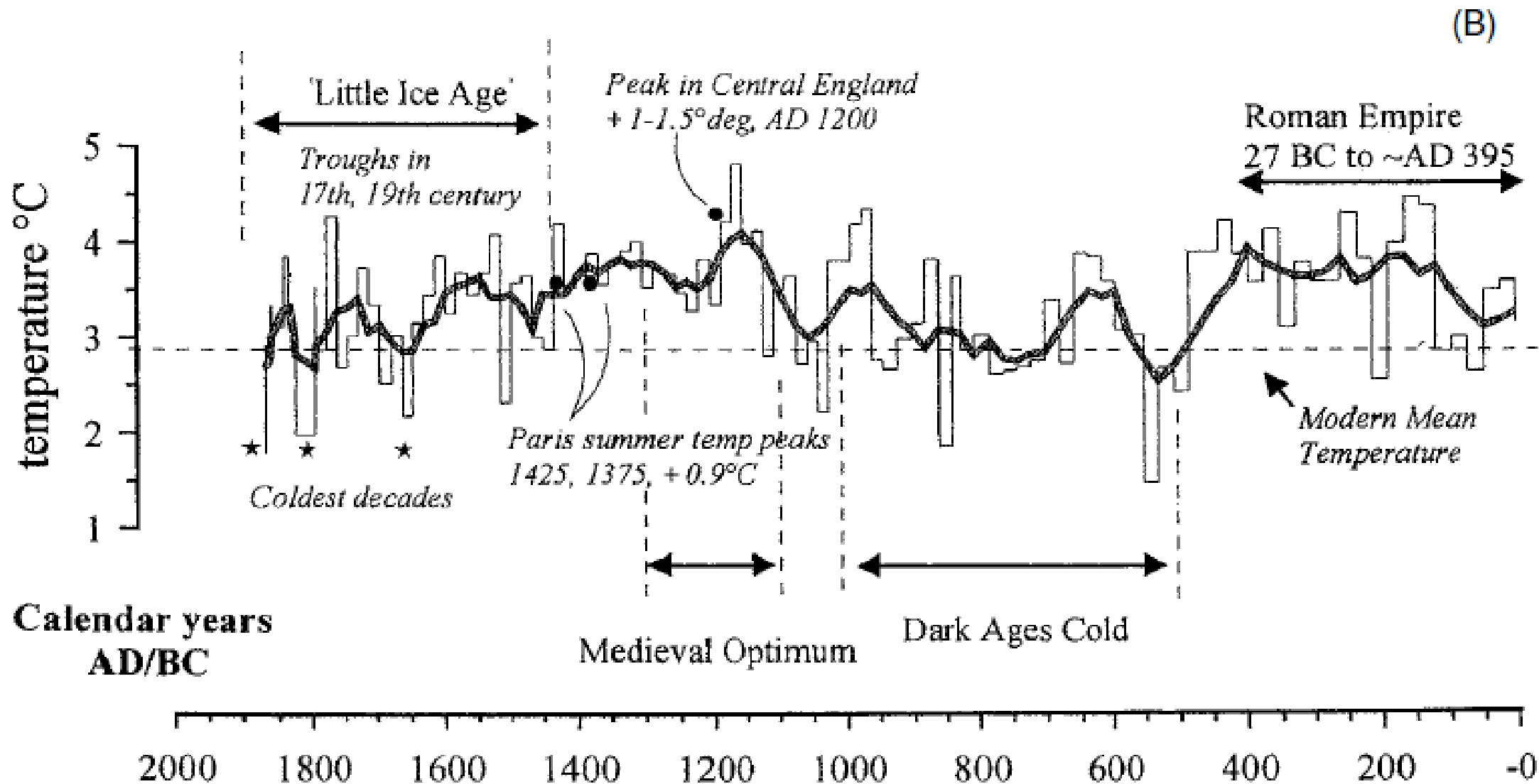
Reliability	Material	Closed system?	Contaminated?
Reliable	Unaltered coral	Closed	Clean
	Clean speleothem		Clean
	Volcanic rocks		–
	Dirty speleothem		Contaminated
Possibly reliable	Ferruginous concretions	Possibly closed	Contaminated
	Tufa		Contaminated
	Mollusc shells		Contaminated
	Phosphates		Contaminated
Generally unreliable	Diagenetically altered corals	Open	Clean
	Bone		?
	Evaporites		Contaminated
	Caliche		Contaminated
	Stromatolites		Contaminated
	Peat and wood		?

Důležitá je uzavřenost systému

Aplikace:

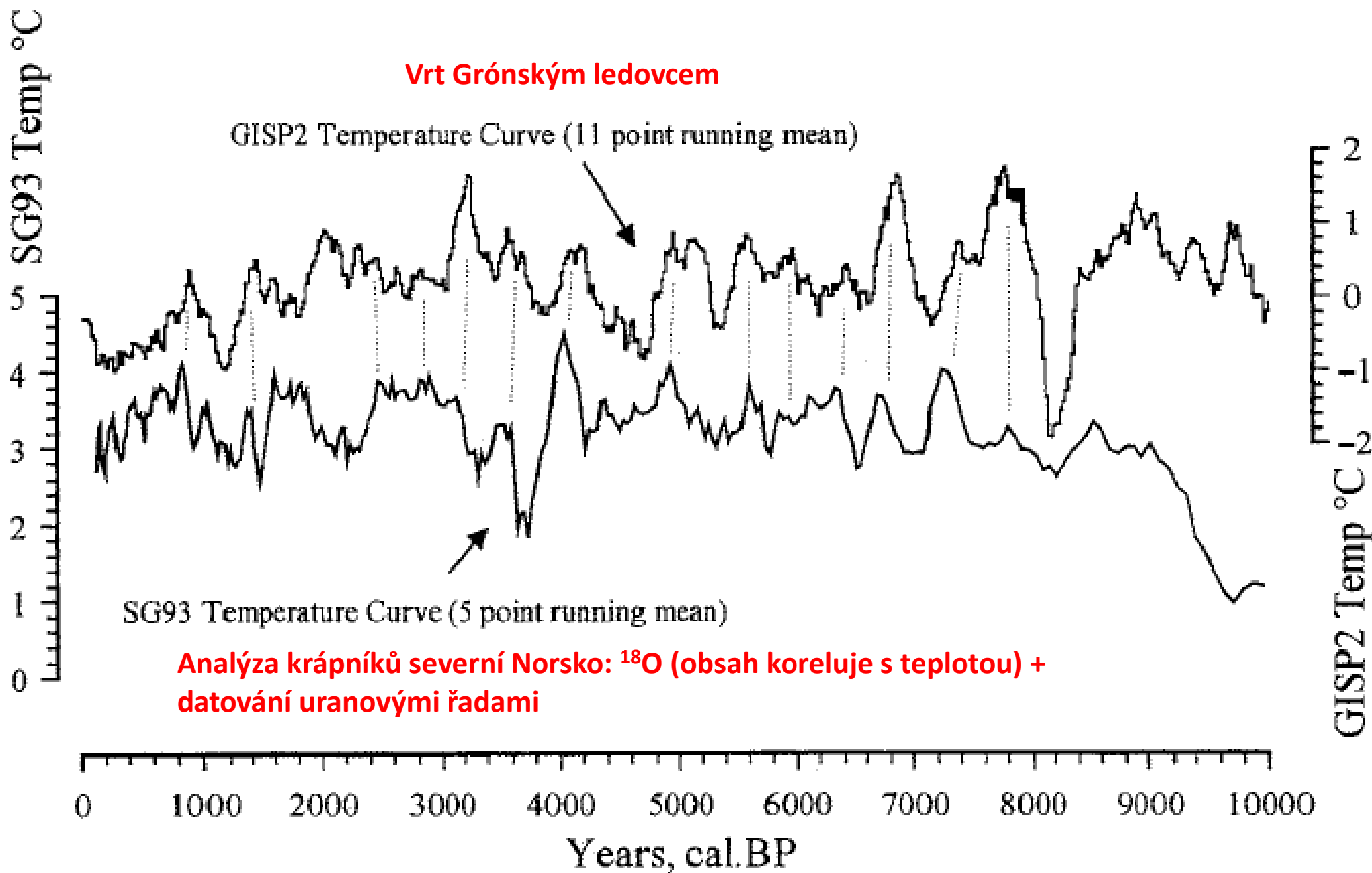
- Kolísání hladiny moří podle datování korálů a datování podmořských karbonátových ploten
- datování krasů (krápníky)
- datování organických sedimentů s rezidui karbonátů
- datování zubů

Analýza krápníků: Teplota odvozená z delta¹⁸O ve vztahu k časové ose založené na uran/thoriovém datování a porovnání s historickým měřením a údaji



Vrt Grónským ledovcem

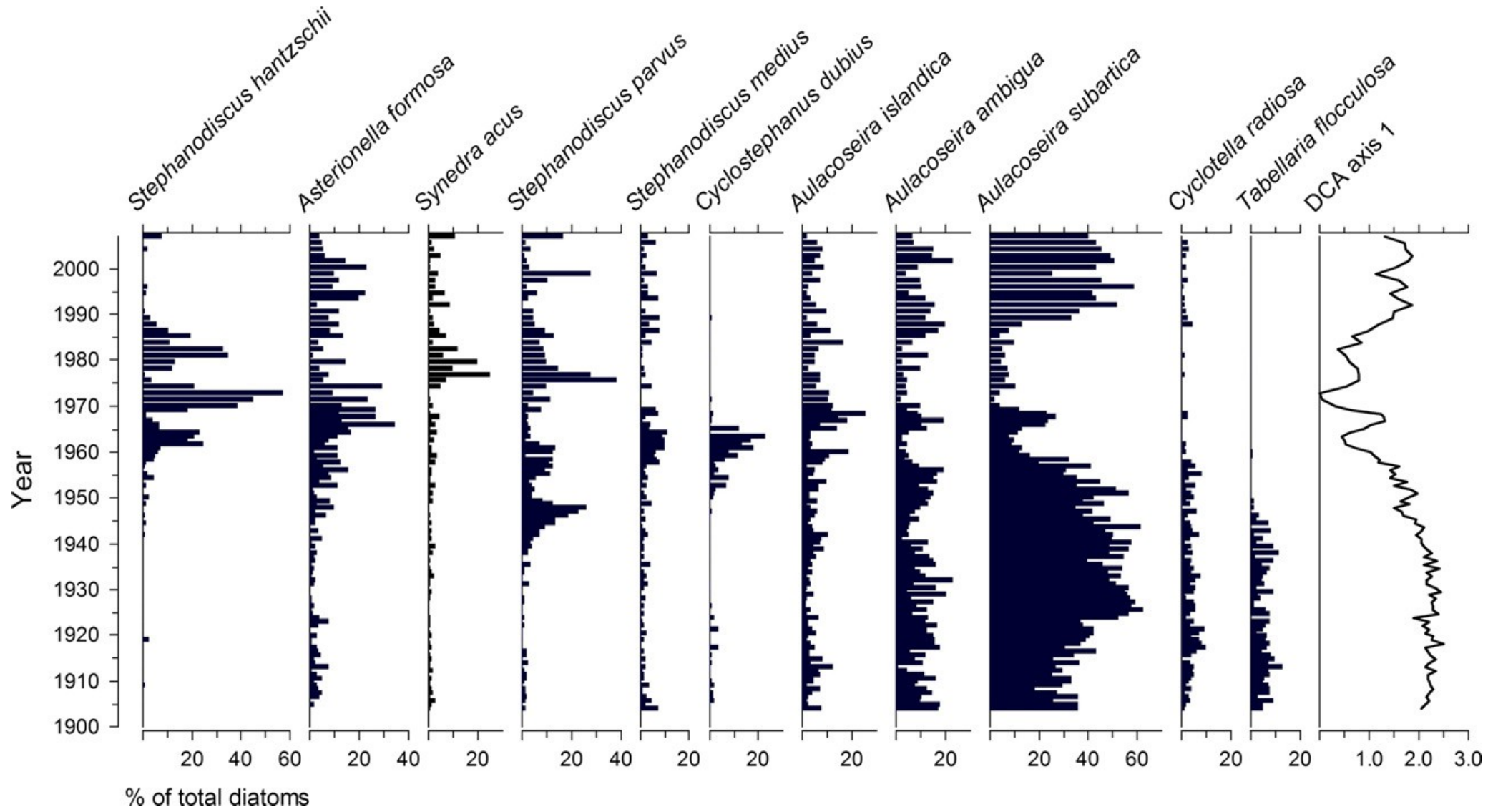
GISP2 Temperature Curve (11 point running mean)



1. Radiometrické datovací metody: Datování pomocí izotopů s krátkým poločasem rozpadu

- Nejpoužívanější je ^{210}Pb (poločas rozpadu 22.26 let)
- Objeveno v šedesátých letech
- Primární použití bylo pro datování jezerních sedimentů do 150 let
- Vzniká **rozpadem radonu v atmosféře** a akumuluje se v jezerních a mořských sedimentech, v půdě, rašelině a ledovci, kde se dále rozpadá na ^{206}Pb během ca 150 let
- **Měřením poměru $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$** v profilu ve vztahu k hloubce a při předpokladu, že přísun ^{210}Pb do atmosféry je konstantní, lze stanovit dobu, která uplynula od uložení ^{210}Pb do sedimentu (čím delší je ta doba, tím větší obsah ^{206}Pb)
- Problémy: sedimenty většinou obsahují i nějaké ^{210}Pb z rozpadové řady uranu a to musí být odděleno od toho z atmosféry

Použili datování ^{210}Pb v 15 cm intervalech destilací ^{210}Pb a alfa-spektrometrií

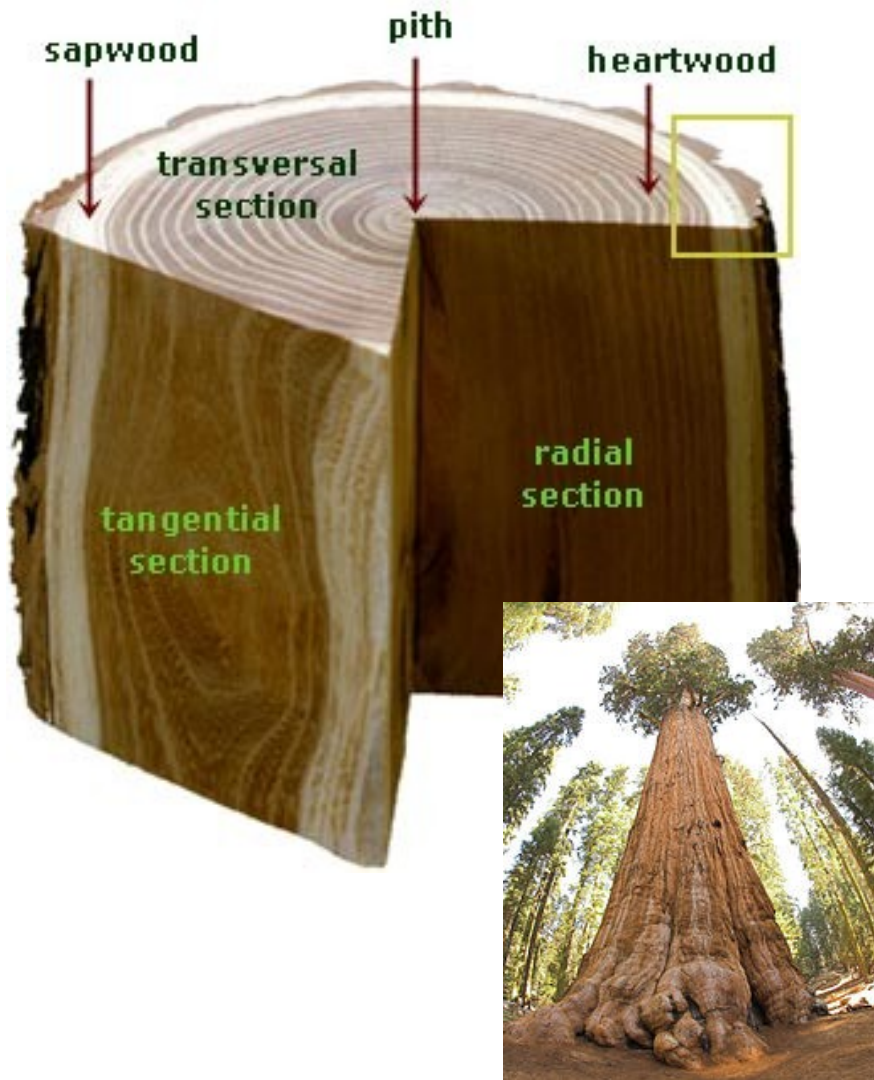


Anderson et al. 2012: Climate forcing of diatom productivity in a lowland, eutrophic lake: White Lough revisited. *Freshwater. Biol.* 57, 2030–2043.

1. Radiometrické datovací metody: Luminiscence

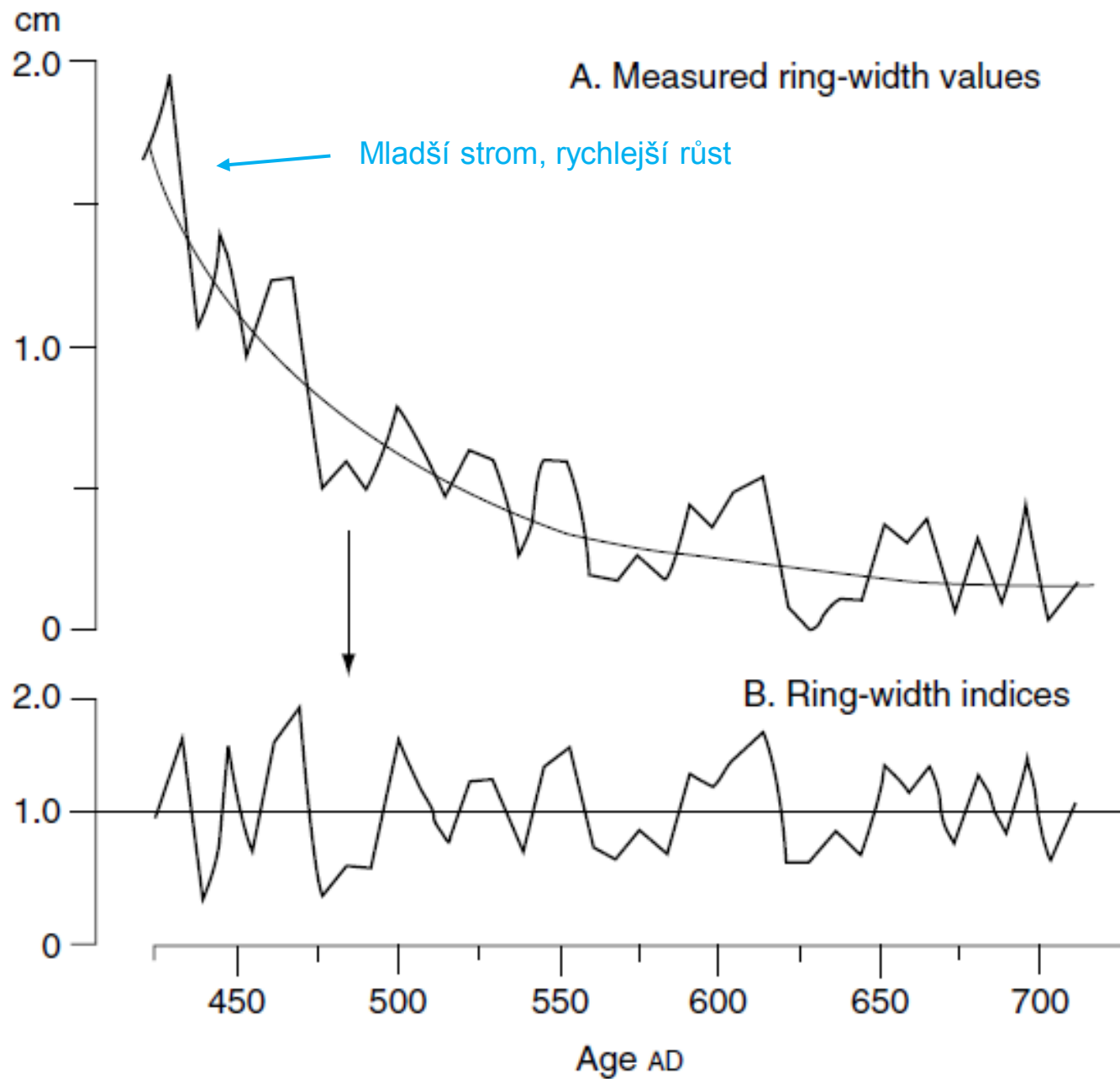
- Všechny materiál, který obsahuje **uran, thorium nebo draslík** (všechny sedimenty a vulkanické horniny), jsou vystavené neustálému bombardování **α , β a γ částicemi**, které se uvolňují při rozpadu
- To vede k ionizaci atomů a **uvolněné elektrony jsou pohlcovány do krystalické mřížky minerálů**
- Tyto elektrony mohou být znovu uvolněny zahříváním (**thermoluminiscence**) – projevuje se charakteristickou emisí světla, která odpovídá množství pohlcených elektronů, intenzita termoluminiscence odpovídá době po kterou byl objekt vystaven záření (od vzniku po současnost), **využití: datování vypálených předmětů (keramika) nebo spraší. Proč?** Vysoká teplota a dlouhé vystavení slunečnímu světlu „vyprázdňují“ elektronové pasty v minerálech, tzn. **termoluminiscenční hodiny se vynulují**. Měříme tedy dobu od vypálení keramiky nebo „vybělení“ tedy uložení spraši.
- **Opticky stimulovaná luminiscence (OSL, 1985)** – datování sedimentů, které před pohřbením nebyly dlouho vystavené světlu. Elektrony jsou z pastí uvolňované světlem (např. zelený laser nebo infračervené záření). Vzorky se musí odebírat tak, aby se nedostaly na světlo!
- **Důležitý parametr**, který je potřeba znát: množství elektronů, které ta která hornina je schopná pohltit za určitý čas tzv. „dose rate“

2. Přírůstkové datovací metody: Dendrochronologie



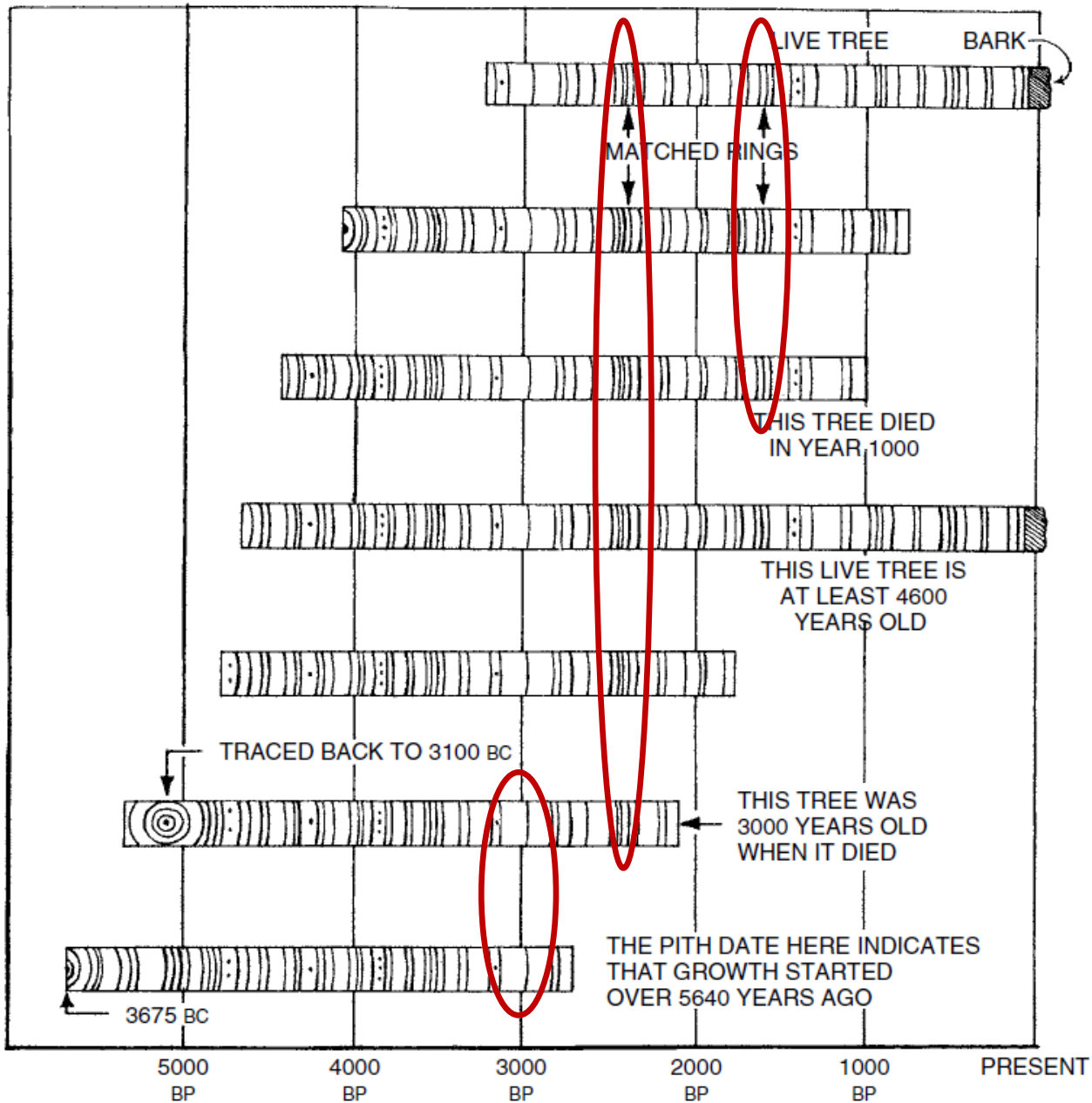
- **Datování pomocí počítání letokruhů**, co rok to jeden letokruh: jarní (řidké, světlé) + letní (husté, tmavší) dřevo
- Strom se buď pokácí nebo se vyvrtá vrtákem váleček, na několika místech se spočítá buď vizuálně nebo pomocí elektroniky (LAPE: dendrochronologická laboratoř: měřicí přístroj s odečítacím modulem +software pro měření a datování vzorků)
- Nejvíce využívané **jehličnany (*Pinus, Sequoia*)** – jednodušší stavba, snazší rozlišit letokruhy, z listnáčů nejpoužívanější ***Quercus*** (kruhovitě pórovitá dřevina)
- Šířka letokruhů – ovlivňována podmínkami prostředí (sucho, vlhko), nejvýznamnějším faktorem je **klima** – studuje samostatný obor **dendroklimatologie** (měření šířky letokruhů nebo hustoty dřeva pomocí paprsků X, tzv. X-ray densitometry“ - přesnější)
- **Problémy:** mladší dřeviny rostou víc (širší letokruhy) než starší, může se lišit v různé výšce od země, v příznivých podmínkách i dva letokruhy za rok (tzv. „false rings“) nebo naopak ve špatných podmínkách je letokruh neidentifikovatelný (tzv. „missing“ nebo „partial rings“)

Sequoiadendron giganteum (Sequoia National Park, California), 2300-2700 let starý



Indexy, které řeší rozdílnou šířku letokruhů u mladých a starých stromů.

Po odseparování vlivu věku dostaneme čistý vliv podmínek prostředí, resp. klimatu



Cross-dating – využívá se skupin odlišných letokruhů (nápadně úzké nebo naopak široké) jako **márkrů**

Tzv. „**master chronology**“ (na základě recentních stromů)

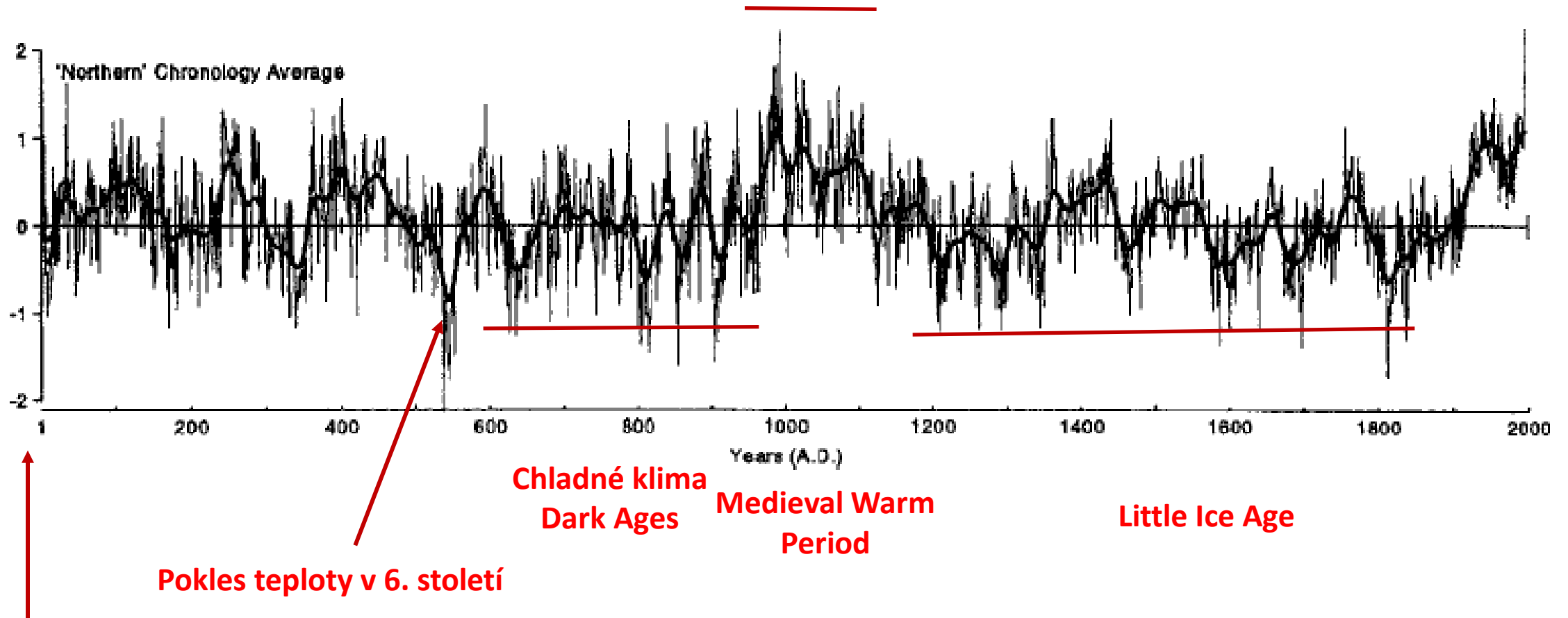
+ „**floating chronology**“ (sestavená napojením řady fosilních kmenů pomocí markrů)

Aplikace:

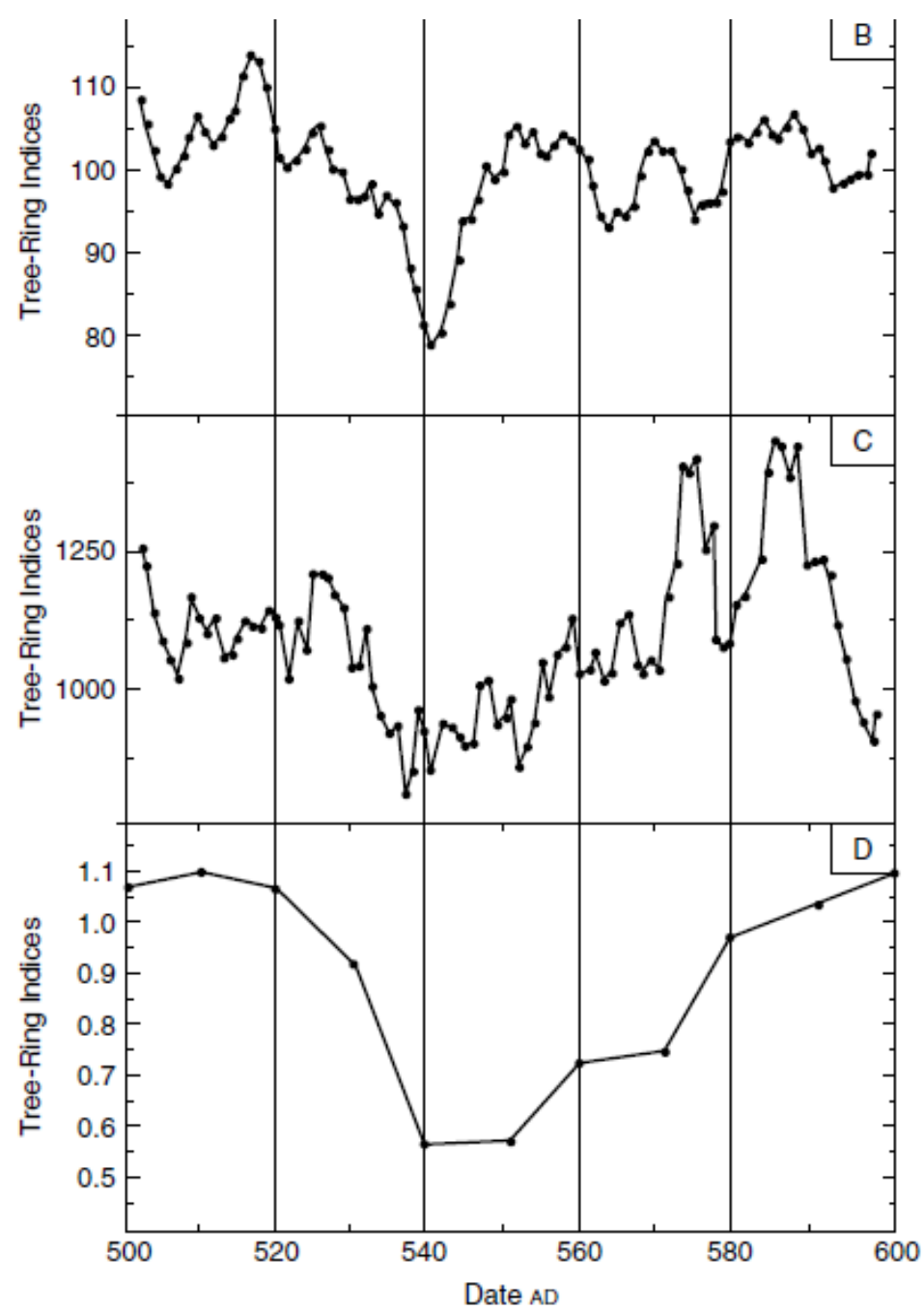
- Podle šířky letokruhů mohou být detekovány různé události v minulosti: změny klimatu, vulkanické erupce: prach a sírany mohou způsobit snížení přísunu slunečních paprsků a klesá na několik let teplota (např. lze identifikovat letokruhy poškozené mrazem několik let po sobě)
- Uplatnění v archeologii (datace různých objektů vyrobených ze dřeva)
- Kalibrace radiokarbonových dat (asi nejvýznamnější)

Northern Chronology Average

(založeno na datech ze severní polokoule mezi 60 a 70 stupni sev. šířky)



Osa y: Relativní změna teploty odvozená z šířky letokruhů



Evropské duby

Pinus longaeva

Pinus balfouriana

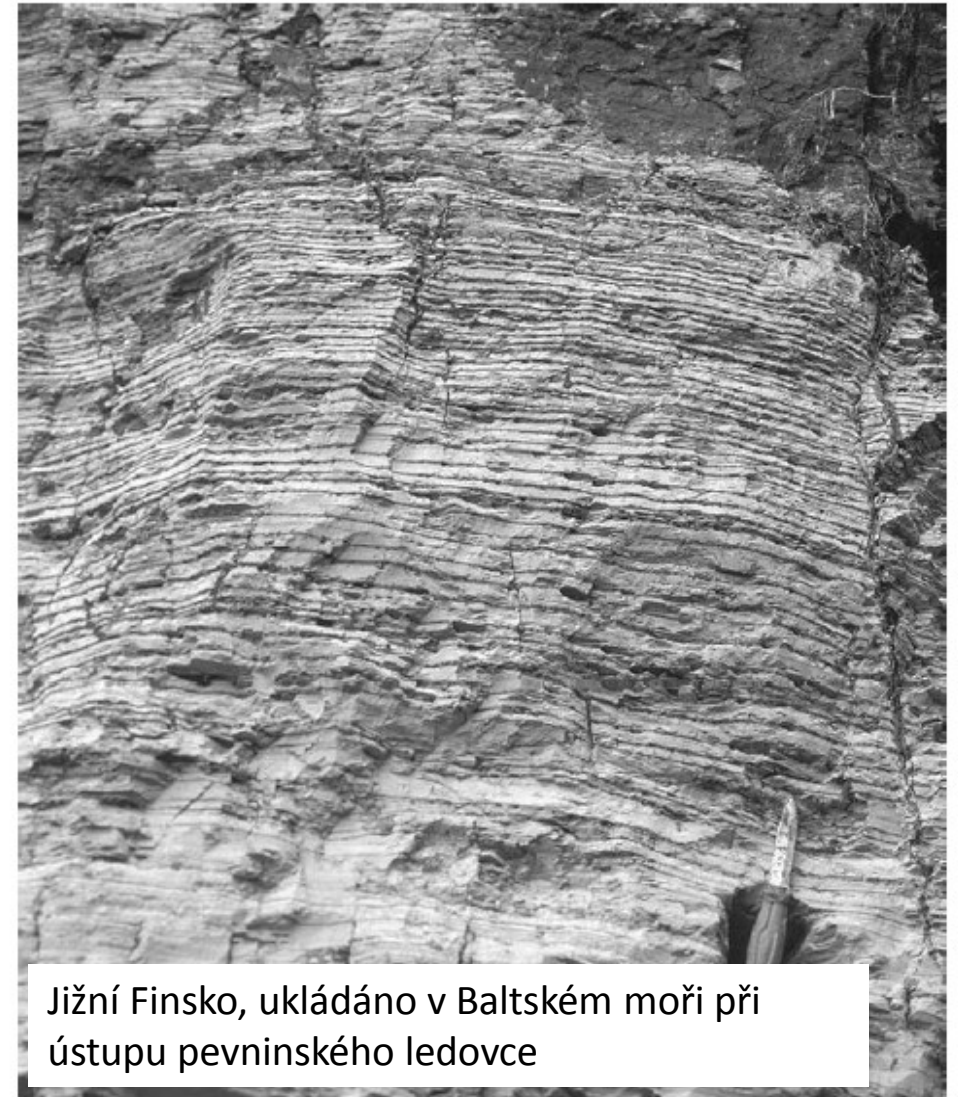
2. Přírůstkové datovací metody: chronologie varv (ze švédštiny „varv“= úsek)

Využívá rytmického ukládání sedimentů , což vytváří vrstevnatost (laminaci). Analyzují se laminované sedimenty, kde každá vrstvička odpovídá jednomu roku

- Glaciolakustrinní varvy:** vytváří se v proglaciálních jezerech nebo mělkých mořích každoročně zásobovaných materiálem při jarním tání ledu. Hrubší částice klesají ke dnu, zatímco jemnější zůstávají v suspenzi. V zimě jezero zamrzne a jíl postupně klesá ke dnu a vytváří zimní jílovitou vrstvu. Měření pod mikroskopem nebo dalšími technikami: X-radiografie, skenovací elektronový mikroskop atd.

- Lakustrinní varvy:** jen v hlubokých jezerech, kde je u dna málo kyslíku a nežije tam moc organismů, které by sedimenty na dně promíchávaly, holomiktická jezera (bez varv), meromiktická jezera (jemná laminace je přítomná)

- Další typy varv: např. při sezónní variabilitě ve srážení CaCO_3 (léto, víc srážení, světlá vrstvička x v zimě méně srážení, usazuje se organika, tmavá vrstva)



Jižní Finsko, ukládáno v Baltském moři při ústupu pevninského ledovce

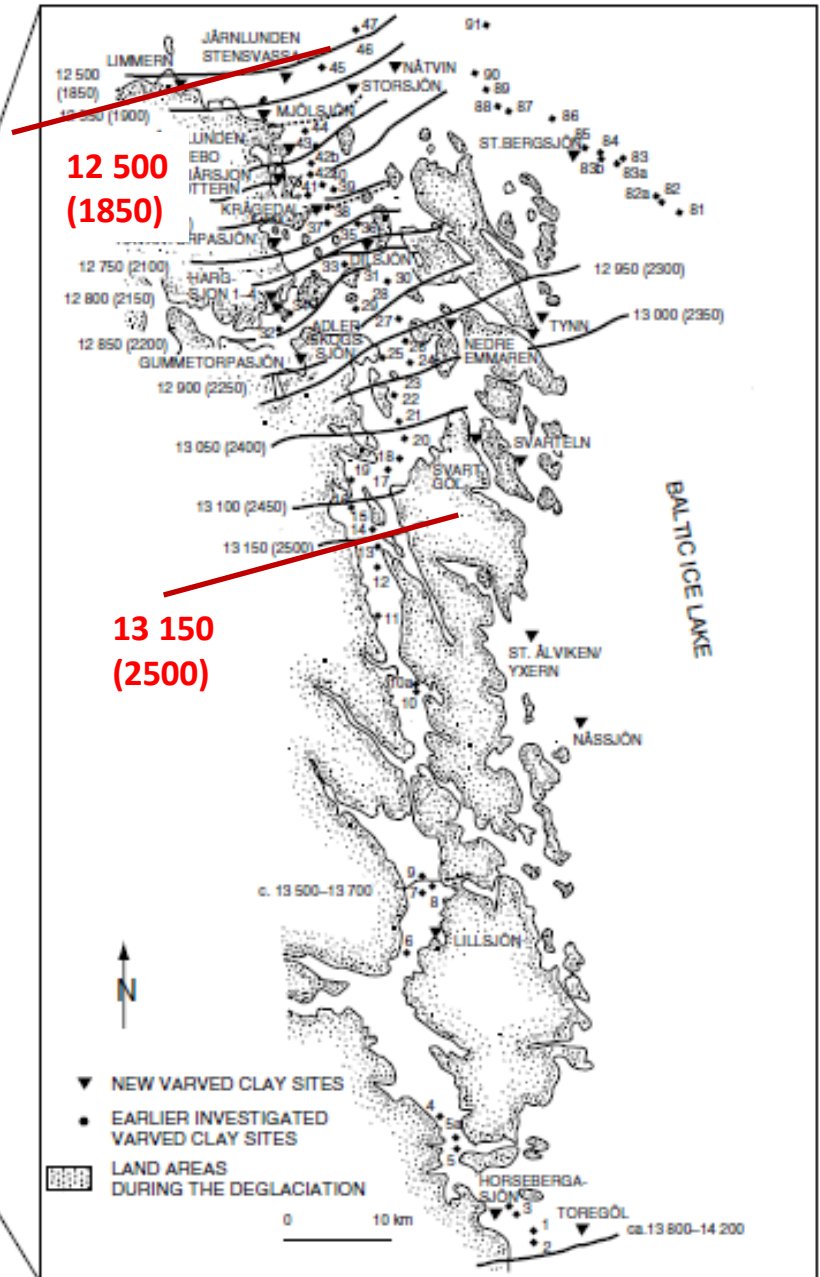
Aplikace

- **Rekonstrukce ústupu ledovce** (především Skandinávie, sev. Amerika – ústup Laurentinského ledovce, ale nebylo moc zkoumáno)

První to zkoumal de Geer (1912) – střední Švédsko, identifikoval nápadné varvy – velký přínos materiálu (přechod pozdní glaciál/holocén). Tento výchozí bod de Geerovy časové škály byl vzat jako klíčová reference pro další práce (tzv. nulová varva), starší varvy pak dostaly zápornou hodnotu, mladší kladnou.



Wohlfahrt et al. 1988

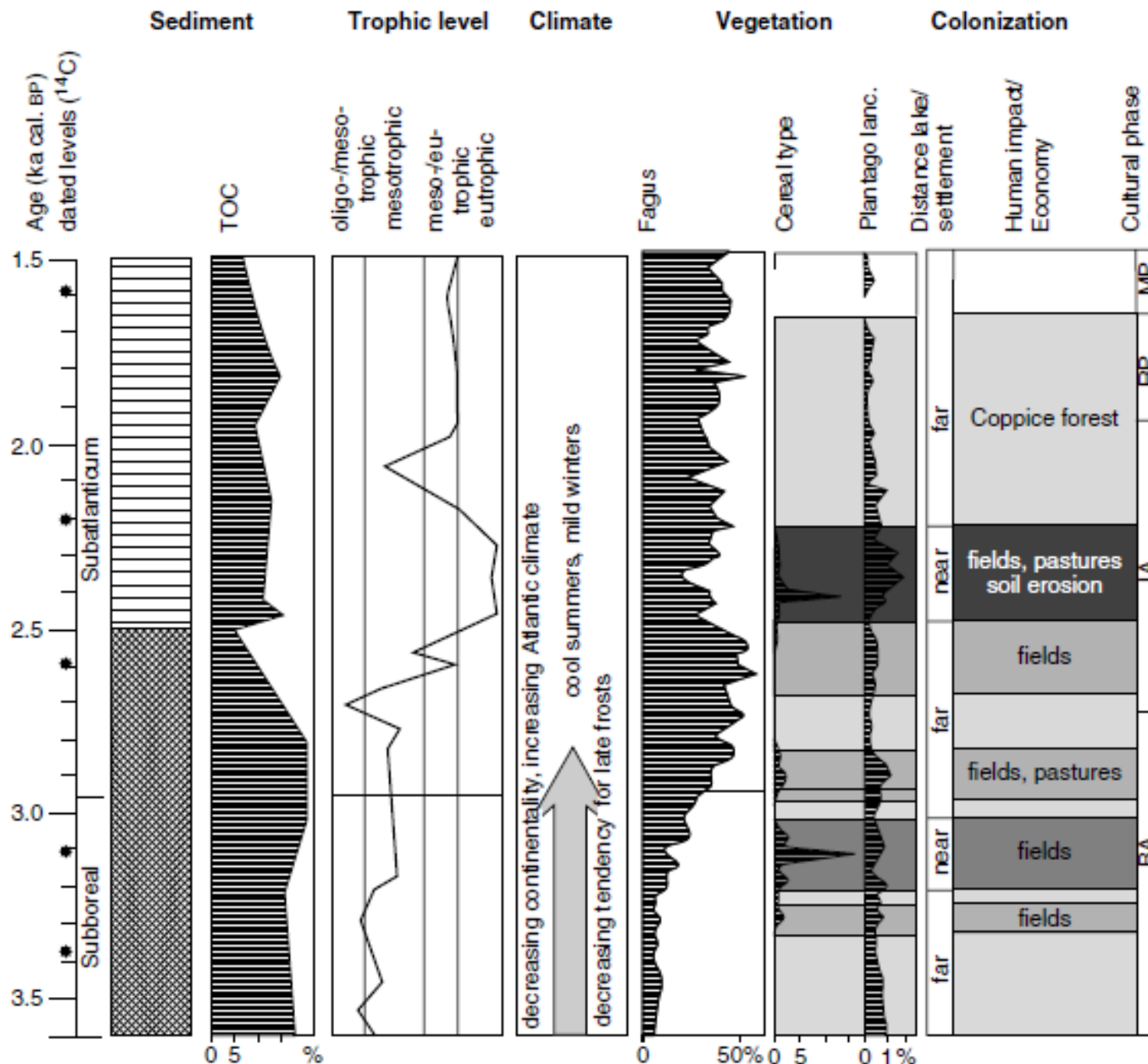


- **Datování změn ve využívání krajiny v okolí jezera**

Jezero Jues v pohoří Hartz, analyzovány ročně laminované jezerní sedimenty které byly doplněny kalibrovaným radiokarbonovým stářím

- **Kalibrace radiokarbonových dat**
IntCal98 obsahuje série mořských varv tvořených mořskými planktonními organismy z Venezuely doplněných radiokarbonovým datováním (pokrývá období 9 – 14.5 tis. cal. BP)

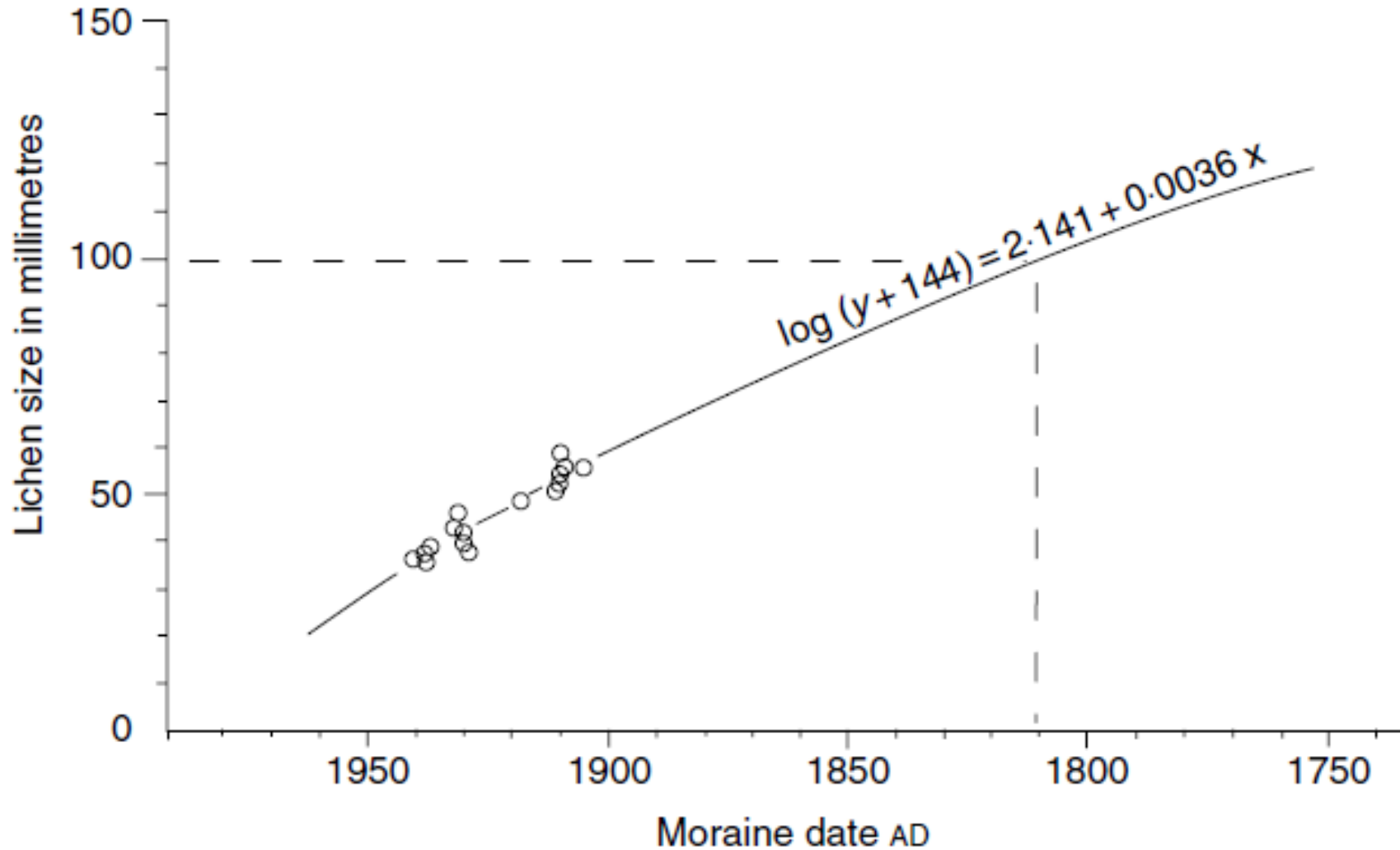
Zolitschka et al. (2003)



2. Přírůstkové datovací metody: lichenometrie

- Metoda využívající **přírůstky stélky lišejníků**
- Lišejníky jsou symbiotické organismy tvořené řasou (fotosyntéza) a houbou, která tvoří ochranu řase
- Poprvé použil Beschel 1973, využil přímého **vztahu mezi velikostí lišejníku a jeho stářím**
- **Předpoklady:** a) nebyla dlouhá doba mezi vznikem horniny a osídlením jejího povrchu lišejníkem; b) musíme znát, jak rychle příslušný lišejník roste
- Některé druhy lišejníků mohou růst kontinuálně i několik tisíc let (např. *Rhizocarpon geographicum*). Většinou je metoda omezená na ca 4.500 let BP (chladné a suché kontinentální oblasti, např. Grónsko) a pouhých 500 let a méně jinde





Použití:

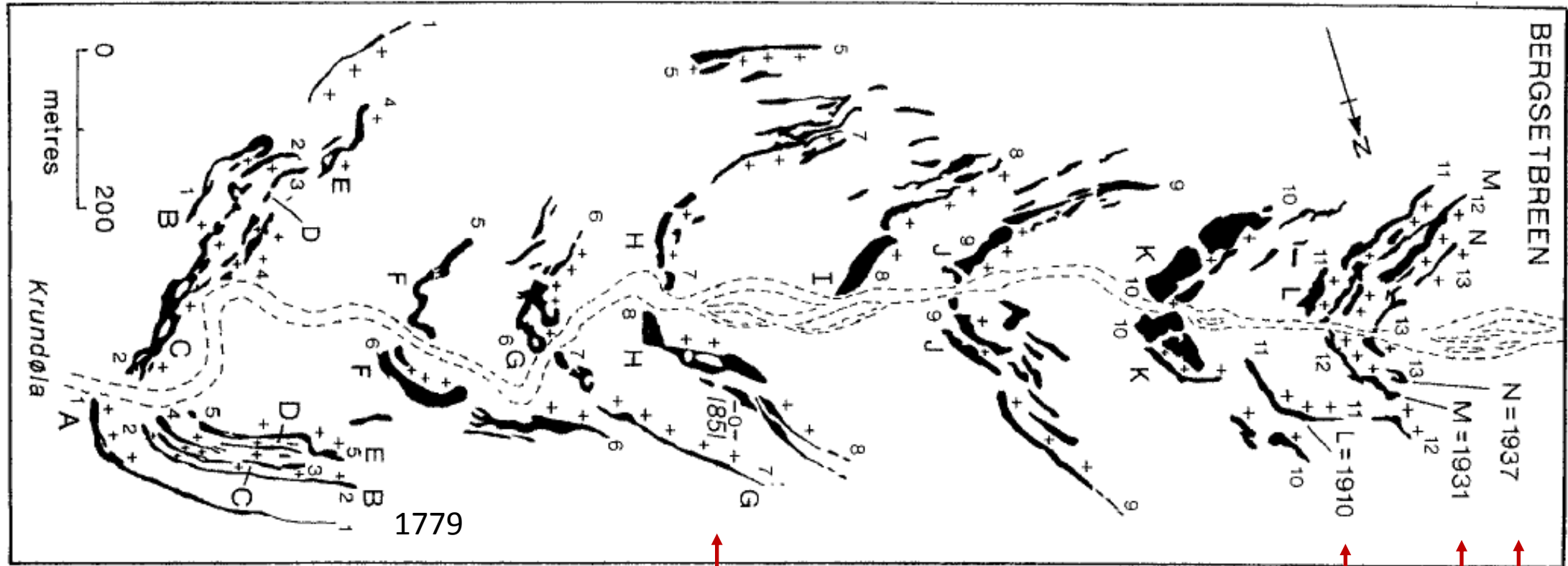
- **ústup ledovce:** velikost lišejníku (průměr stélky) je nejdříve stanovena pro povrch morén známého stáří (radiometricky datované nebo historické doklady, např. letecké fotografie) a poté sestrojena růstová křivka. Následně je možné podle velikosti největších lišejníků určit i stáří morén, kde není k dispozici žádný údaj o jejich stáří
- **Poskytuje časovou škálu pro studium kolonizace nových substrátů** různými organismy

Opět i řada problémů:

- Ne všechny lišejníky jsou vhodné (podmínkou pravidelný růst)
- Platnost vždy omezená jen pro území, odkud je růstová křivka, protože rychlost růstu je ovlivněna různými podmínkami prostředí

Ústup ledovců od malé doby ledové studován např. ve Skandinávii (datování na základě lichenometrie)

Bergsetbreen – sled 14 morén, které byly vytvořeny při krátkodobých růstech ledovce v rámci postupného ústupu (celkem 4 km), který začal v polovině 18. století (*Bickerton and Matthews 1993*)



Predikované stáří se shoduje perfektně se stářím doloženým historicky +/- 4 roky

1815

1910

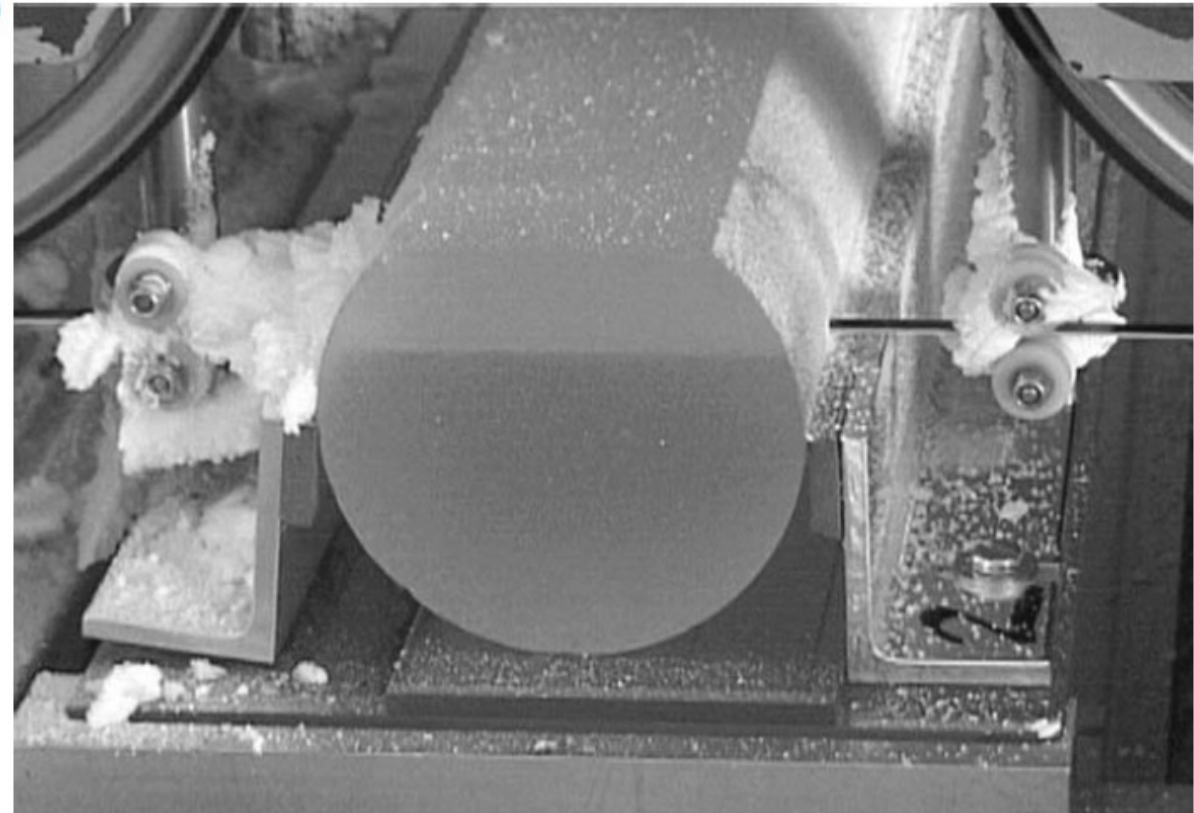
1931

1937

2. Přírůstkové datovací metody: roční vrstvičky v ledovci

- Horní vrstvy ledovce obsahují také roční laminaci, která odráží roční přírůstky sněhu na povrch ledovcového příkrovu
- Čím hlouběji, tím jsou vrstvičky užší a hůře rozeznatelné, mohou být také více deformované.
- Zároveň s vizuální analýzou ledu lze měřit i různé parametry odrážející změny prostředí (např. klima): $\sigma^{18}\text{O}$ izotop kyslíku, konduktivita ledu, obsah prachu a mikročastic, chemické složení

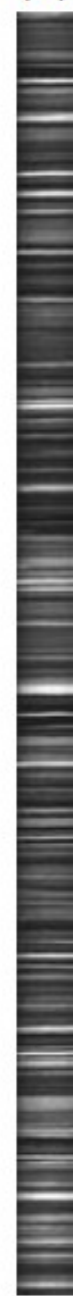
- Grónsko – ledovec narůstal relativně rychle, vhodné na analýzu.
- Dva vrty: **GRIP (Greenland Ice Core Project, evropský projekt, 1992)** přímé počítání ročních přírůstků je základem časové škály jdoucí zpět 14.5 tisíc let; **GISP2 (Greenland Ice-Sheet Project 2, americký projekt, 1993)** umožnil vytvoření chronologie do 17.4 tisíc let přímým počítáním a 40.5 tisíc let za použití interpolace. Na to jsou navázány analýzy izotopů kyslíků jako ukazatele globálních klimatických změn.
- Celkem tyto dva profily dosahují podloží v hloubce ca 3 km a pokrývají posledních 100 000 let
- Antarktický vrt Vostok (rusko-francouzský) poskytuje záznam starý 400 000 let. Analýzy jsou ale obtížnější (pomalejší přirůstání ledu, větší difuze izotopů)



(D)

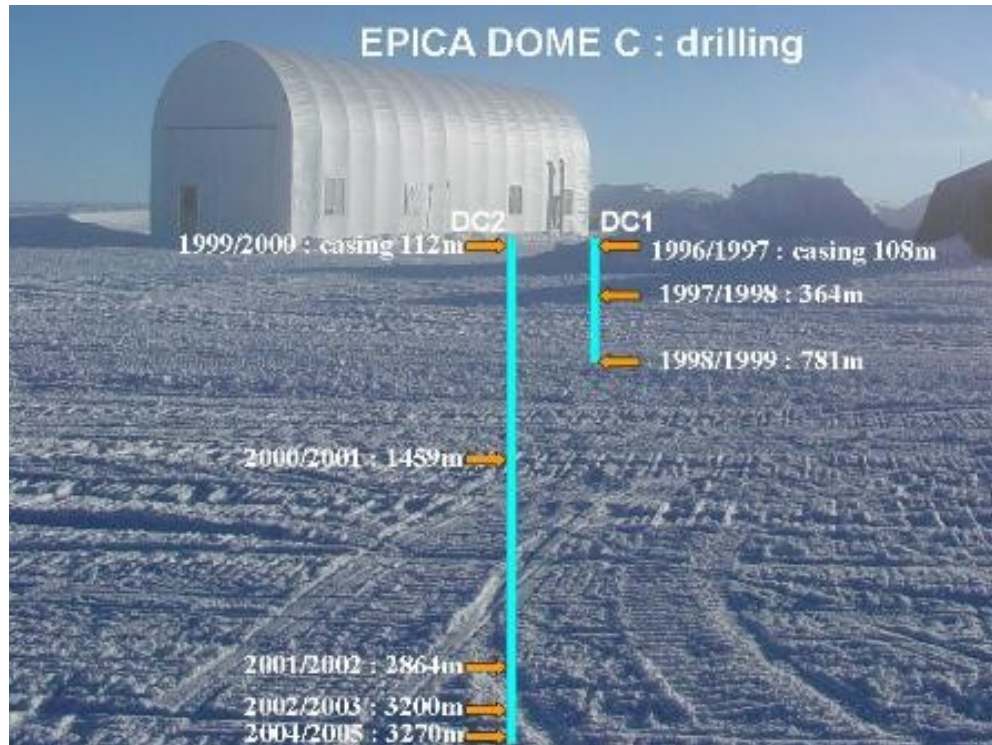


(C)

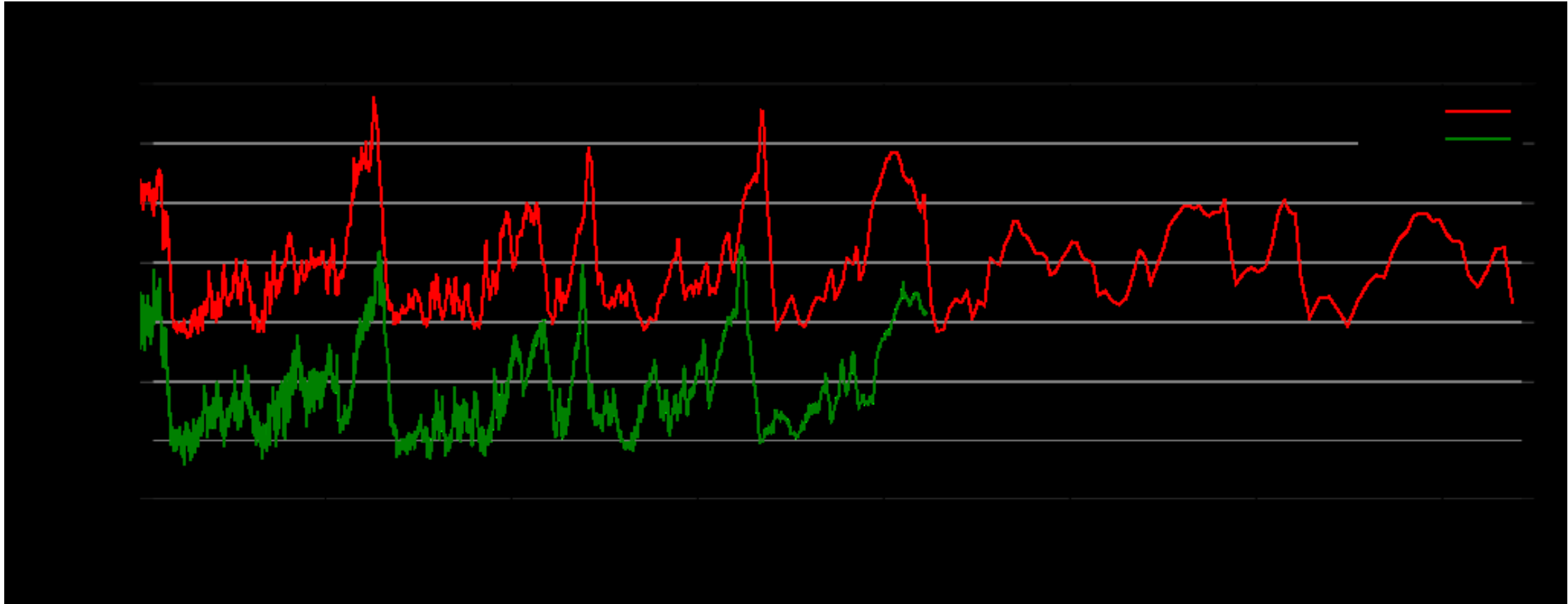


Evropský projekt na Antarktidě (EPICA) probíhá, podílí se na něm 10 evropských zemí.

Drilling was completed at this site in December 2004, reaching a drilling depth of 3270.2 m, 5 m above bedrock. The retrieved core will extend the record to an age estimated to be around 890 000 years old.



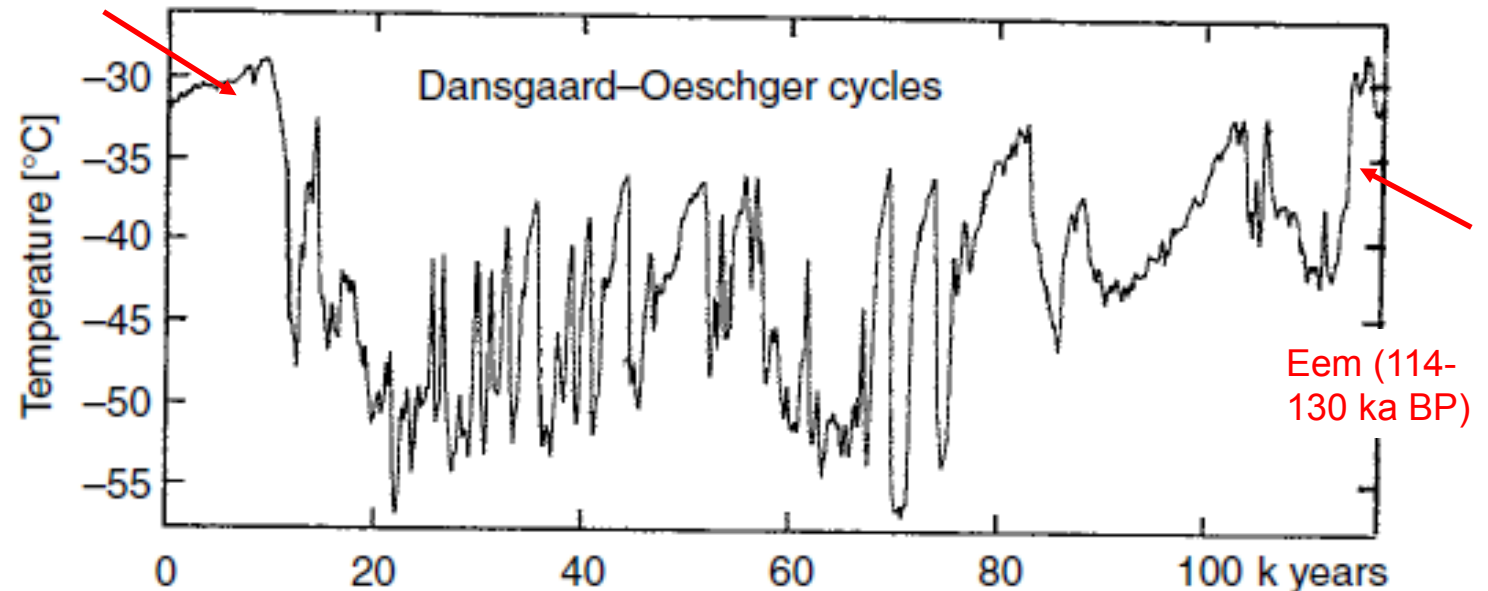
	Concordia Station, Dome C	Kohnen Station, Dronning Maud Land
Co-ordinates	75°06'04"S; 123°20'52"E (or 75°06'S; 123°21'E)	75°00'06"S; 00°04'04"E (or 75°00'S; 00°04'E)
Altitude (above sea level)	3233 m	2892 m
Mean annual surface temperature	-54.5°C (10 m depth measurement)	-44.6°C
Mean annual accumulation rate	25.0 kg m ⁻² year ⁻¹ (used for present time scale) 25.6 kg.m ⁻² .year ⁻¹ (using Tambora) 25.4 kg.m ⁻² .year ⁻¹ (last 1000 years)	64.0±0.5 kg.m ⁻² .year ⁻¹ (for last 1000 and last 4000 years)
Measured ice thickness	3309±22 m	2750±50 m
Notation of ice cores	EDC96 and EDC99	



- Ledovec je velmi významným archivem změn prostředí v minulosti
- Obsahuje záznam změny atmosférických plynů (CO₂, metan) v bublinách vzduchu uzavřených v ledovci, sopečný prach, variabilitu v různých izotopech (hlavně kyslíku, $\sigma^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – odráží teplotu vzduchu)
- Hlavní výstup – ukázalo se, jak proměnlivé klima na Zemi v minulosti bylo, že pohled o střídání dlouhých studených glaciálů (ca 100 000 let) a kratších teplých interglaciálů (ca 10 000) je velmi zjednodušený. Mezi 20 000 a 115 000 BP bylo minimálně 25 velkých klimatických fluktuací se změnou teploty až o 15 °C.

- Oteplení bylo často rychlé třeba jen 50 let, ochlazování bylo většinou výrazně pomalejší
- Cykly teplejších a chladnějších výkyvů byly 500- 2000 let
- Tyto výkyvy odrážejí kombinaci zpětných mechanismů zahrnujících fluktuace ledovcového příkrovu, oceánografické změny a variabilitu atmosférické cirkulace

Holocén



3. Metody věkové equivalence (Age equivalent stratigraphic markers methods)

V mnoha kvartérních uloženinách se vyskytují tzv. **markrové horizonty**, které lze najít na různých místech. Sami o sobě nepomohou datovat, pokud ale jsou někde jednou datované (buď radiometricky nebo pomocí přírůstkových metod), mohou se pak využívat jako indikátory stáří. Vzhledem k jejich širokému rozšíření pak mohou být podkladem pro stratigrafické členění.

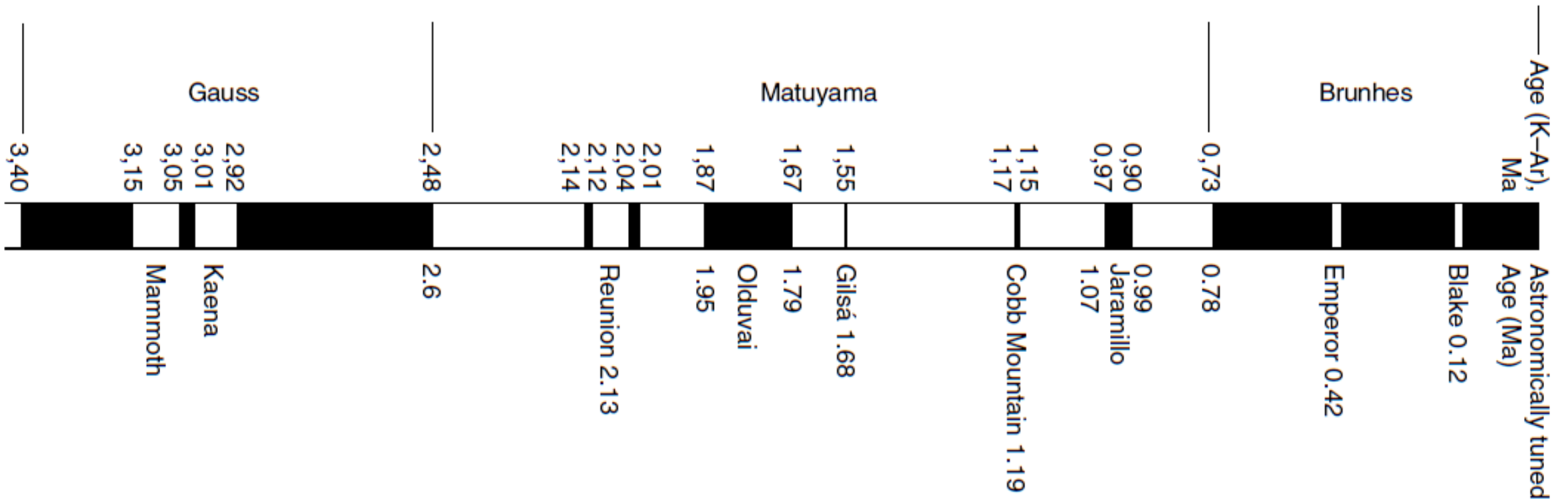
- **Paleomagnetismus** – založeno na změnách v zemském magnetickém poli, které jsou zaznamenány v horninách
- **Tephrochronologie** – použití vrstviček sopečného prachu jako indikátoru stáří
- **Chronostratigrafie izotopů kyslíku** – využívají globálně synchronní změny v izotopovém záznamu v hlubokomořských sedimentech. Referenční stratigrafie jsou datovány pomocí paleomagnetismu nebo nastavení orbitálních parametrů.

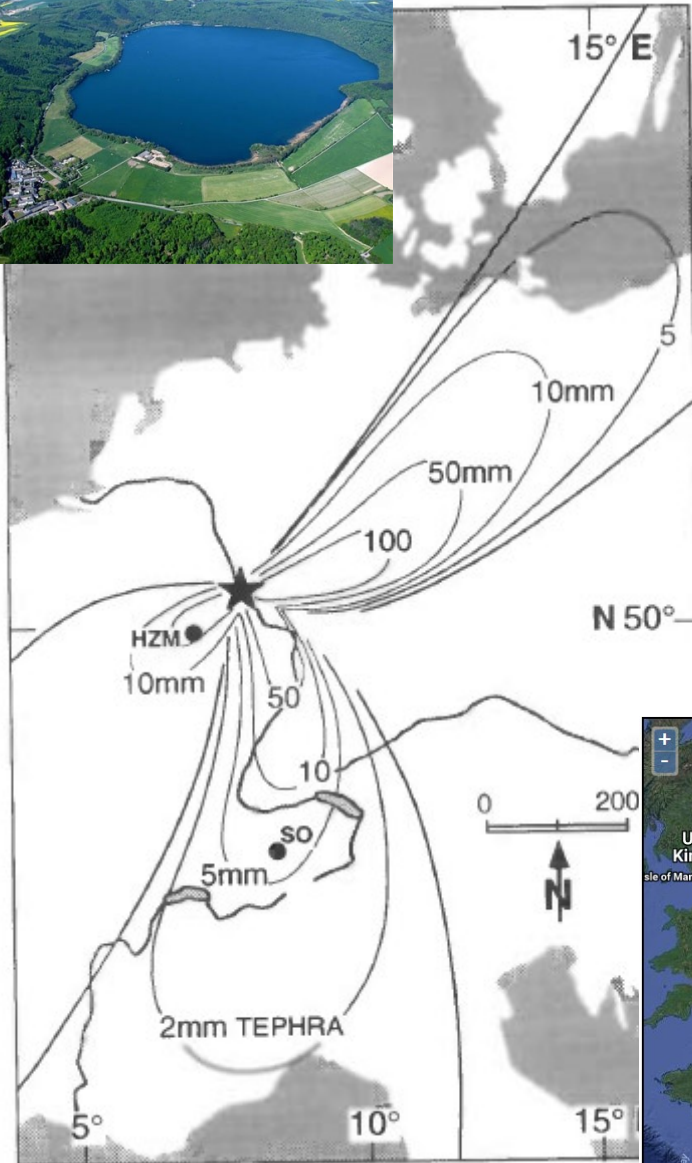
- Normální polarita – ta dnešní (černě), reverzní – ta opačná (bíle)

Dlouhá období stabilní polarity – **epochy (Brunhes, Matuyama, Gauss)**, kratší **události (Jaramillo, Olduvai)** a nejkratší „**excursions**“

- Pokud je paleomagnetický záznam ve vulkanických horninách, lze datovat pomocí K-Ar metody – vznikla tak datovaná paleomagnetická stratigrafie.

- Tato magnetická časová škála slouží jako reference a porovnáním s ní je možné stanovit stáří sedimentů např. v jednotlivých hlubokomořských vrtech.





Tephrochronologie

- Využití v oblastech s častou sopečnou aktivitou (v rámci Evropy sz. a j. Evropa, ale i střední Evropa)
- Např. **Laacher See tephra (Německo, 12920 cal. BP)** nalezena na 437 místech
- Každý tephra horizont má unikátní geochemické složení

