

## Projekt 4.4 Aldersbestemmelse og Kulstof 14 datering

---

### Indhold

Første del: Metoden.....	1
Kulstof isotoper .....	2
Henfaldsloven.....	2
Anden del. Anvendelser .....	4
De grønlandske mumier .....	4
Grauballemanden.....	5
Tredje del: Holder vores forudsætninger .....	6
Kulstofkredsløbet .....	7
Er niveauet af radioaktivt kulstof 14 stabilt?.....	8
Kalibreringskurver .....	10

### Første del: Metoden

I slutningen af 1940'erne finder et team på University of Chicago under ledelse af Willard Libby ud af, at man kan bruge det radioaktive stof kulstof 14 ( $^{14}\text{C}$ ), der findes i atmosfæren sammen med almindeligt kulstof 12, til at bestemme alder og datere fund fra ikke så fjerne begivenheder. Opdagelsen udløste en nobelpris i kemi i 1960.

Levende organismer som mennesker, dyr og planter optager kulstof fra atmosfæren og føden livet igennem. Mens man lever, er der en ligevægt mellem indholdet af kulstof i kroppen og indholdet af kulstof i atmosfæren og biosfæren. Men når man dør, stopper udvekslingen af kulstof mellem kroppen og omgivelserne. Nedbrydningen af det radioaktive stof kulstof 14 betyder derfor, at mængden af kulstof 14 i kroppen ikke længere afspejler forholdene i omgivelserne, men nu aftager med tiden. Det omdannes med en halveringstid på 5730 år til ikke-radioaktivt kvælstof (nitrogen).

Libbys ide var nu den enkle at antage, at andelen af radioaktivt kulstof 14 i atmosfæren og biosfæren er den samme overalt på Jorden, og at den har været nogenlunde konstant gennem de sidste 50.000 år. Den samme andel i levende væv er derfor uafhængig af, hvor på Jorden vi er, og hvornår vævet var levende, fordi det levende væv er i ligevægt med omgivelserne. Hvis vi kan finde ud af, hvor meget kulstof 14 der er tilbage i et bestemt fund, må vi derfor kunne regne baglæns og finde ud af, hvornår det pågældende dyr eller menneske døde.

Typisk finder man ud af, hvor meget kulstof 14 der er tilbage i fundet ved at måle på aktiviteten af den biologiske prøve med fx en geigertæller. Men målingen er tricket, for strålingen har meget kort rækkevidde i biologisk væv, og det er derfor kun stråling fra det alleryderste overfladelag, der umiddelbart har chance for at nå frem til tælleren. Det er imidlertid alt for lidt, til at man kan bruge metoden i praksis. Det kræver kemisk snilde at omdanne kulstofindholdet i prøven til en gas, man kan opsamle og måle på.

Willard Libby har selv beskrevet, hvordan metoden blev udviklet i artiklen *The history of radio carbon dating*. Artiklen kan hentes [her](#). Læs mere om Libby på [http://en.wikipedia.org/wiki/Willard\\_Libby](http://en.wikipedia.org/wiki/Willard_Libby).

På siden er der en række links til baggrundsartikler. I artiklen *Naturens egen kalender* fra Ingeniøren, som du kan hente [her](#) kan du læse om kulstof 14 metodens indførelse i Danmark.

## Kulstof isotoper

En levende organisme udveksler gennem sin levetid kulstof med omgivelserne, fx gennem indtagelse af mad og udskillelse af afføring. Når organismen dør, stopper denne udveksling.

### Øvelse 1

- Hvilke kulstofisotoper er stabile, og hvilke kulstofisotoper er ustabile – dvs. henfalder ?
- For hvilke typer af kulstofisotoper forbliver mængden den samme, når en organisme dør ?
- For hvilke typer af kulstofisotoper ændres mængden, når en organisme dør?

Du kan hente information i kemibøger, eller på nettet, fx en side fra Århus Universitet, du kan hente [her](#) eller en side fra *Science*, som du kan hente [her](#).

## Henfaldsloven

Den lovmæssighed, som de ustabile kulstof isotoper henfalder efter, kaldes *henfaldsloven*, som siger:

*Antallet af ustabile (radioaktive) kerner af en bestemt isotop aftager eksponentielt med tiden.*

Den matematiske model, som så anvendes for kulstof isotoper, der henfalder, er altså den eksponentielle vækstmodel  $y = b \cdot a^x$ . Se evt. projekt 4.8, *Kerners henfald*. På A-niveau vil vi vende tilbage med en mere detaljeret begrundelse for denne fundamentale matematiske model.

### Øvelse 2

- Giv en fortolkning af konstanterne og variablene i en sådan model for henfald af isotoper ?
- Vis, at formlen for fordoblingskonstanten kan omskrives til:

$$\ln(a) = \frac{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}{T_{1/2}}$$

- Anvend den naturlige eksponentialfunktion og potensregler til at omskrive til følgende:

$$a = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_{1/2}}}$$

- Omskriv modellen  $y = b \cdot a^x$  til formen:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Hvad står konstanterne og variablene for i denne model ?

Læs mere om henfaldsloven [her](#).

**Øvelse 3**

For kulstof-14 er halveringstiden 5730 år, og vi vælger begyndelsesværdien til 100%.

- Opstil en ligning for henfaldet af kulstof-14 som funktion af tiden.
- Hvilken af de to modeller er lettest at opstille ?
- Fremstil en passende graf for henfaldet af kulstof-14 som funktion af tiden.
- Bestem tiden, der går, før der er 10%, 60% og 80% af de ustabile kerner tilbage.

*Bemærkning:*

Afhængigt af analysemetoden måler man *enten* antallet af radioaktive henfald i et givet tidsrum, der kaldes *aktiviteten*, eller forholdet mellem mængden af den radioaktive isotop og en ikke-radioaktiv isotop med en anden kernemasse. Denne metode kaldes *massespektroskopi*. Heldigvis er de to størrelser, aktiviteten  $A$  og antallet af radioaktive kerner  $N$ , indbyrdes proportionale:  $A = k \cdot N$ .

*Argument:* Hvis der er dobbelt så mange radioaktive kerner forventer vi også i gennemsnit et dobbelt så stort antal henfald i løbet af et kort tidsrum. Det sikrer derfor, at den samme eksponentielle vækstmodel kan bruges på begge størrelserne, eller sagt med andre ord: Både antallet og aktiviteten aftager eksponentielt med en fælles halveringstid.

## Anden del. Anvendelser

### De grønlandske mumier

I 1972 fandt to grønlandske jægere, brødrene Hans og Jokum Grønvold nogle yderst velbevarede grønlandske mumier i Qilakitsoq i Uummannaq-distriktet i NV-Grønland. To stendækkede grave rummede i alt seks kvinder og to børn, alle påklædte. De havde endda fået ekstra dragter med, og disse giver ny indsigt i den højt udviklede Thule-kultur. Grønlands Nationalmuseum begyndte dog først i 1978 en udgravning. Fundet blev bragt til Danmark til restaurering, konservering og tværfaglige undersøgelser, som bl.a. belyser datidens levevilkår og de gravlagtes helbredstilstand. Tre kvinder og et barn, de bedst bevarede af ligene, forblev urørte i deres skinddragter. De er nu sammen med de øvrige dragter udstillet på Grønlands Nationalmuseum i Nuuk.



#### Øvelse 4

For at fastlægge det tidspunkt hvor de blev begravet anvendte nationalmuseet kulstof 14 metoden. Ved måling af aktiviteten for et lille udsnit af en mumie fandt man 16,7 tællinger i minuttet. Da mumien var et levende menneske forventede man 17,8 tællinger i minuttet. Da vi kender halveringstiden for aktiviteten kan vi derfor regne baglæns og finde dødstidspunktet.

Bestem det årstal, hvor mumierne blev begravet.

Der er lavet en film om de grønlandske mumier. Du kan se lidt af filmen [her](#).

## Grauballemanden

I 1952 fandt nogle arbejdere under tørvegravning ved Grauballe nær Silkeborg et lig. Det var en yngre mand, der havde fået struben skåret over. Det var så velbevaret, at de troede, der var begået en forbrydelse, hvorfor de tilkaldte politiet. Det viste sig at være et moselig af en person, der engang i oldtiden af en eller anden grund var blevet ofret. Det velbevarede lig blev konserveret og er i dag udstillet på Moesgård Museum ved Århus.



### Øvelse 5

Efter fundet er Grauballemanden blevet undersøgt med kulstof 14 metoden. Aktiviteten i manden blev målt til 76% af aktiviteten af den forventede værdi, da han var i live.

Hvor længe siden er det, at Grauballemanden døde?

*Hvis holdet har planlagt at gøre C-14 projektet til en større del af undervisningsforløbet, så anbefales det at indlægge en ekskursion til Moesgård Museum ved Århus, hvor bl.a. Grauballemanden kan ses. På Moesgård kan man bestille et foredrag om dateringsmetoder holdt af forskere ved Nationalmuseets kulstof 14 laboratorium.*

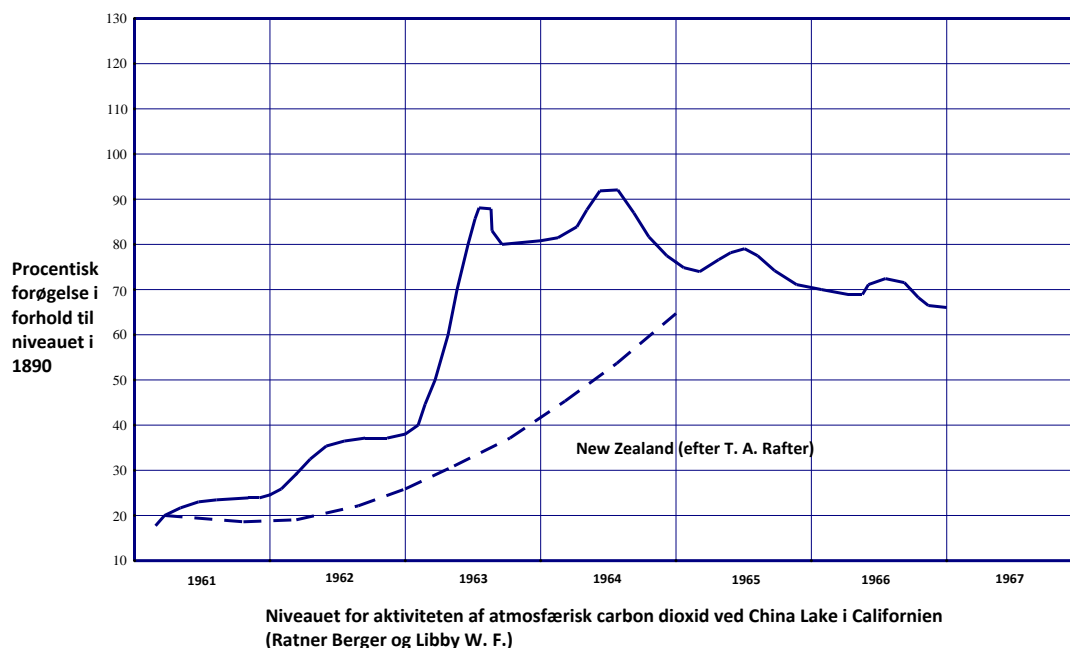
*I arbejdet med dateringsmetoder, kan man også inddrage artiklen: [Isotoper fortæller om fortidens kost, der kan hentes \[her\]\(#\).](#)*

## Tredje del: Holder vores forudsætninger

I første del af projektet har vi kigget på forholdet mellem mængderne af kulstof 14- og kulstof 12-isotoper i levende væv, henholdsvis dødt væv. I levende væv har vi antaget, at forholdet er konstant, fordi det levende væv er i ligevægt med omgivelserne. I det døde væv, hvor der ikke længere udveksles kulstof med omgivelserne, aftager forholdet derimod eksponentielt med en halveringstid på 5730 år. Det nuværende forhold mellem de to isotoper i det døde væv kan findes ved snedige målinger. Hvis vi derfor kan sige noget om niveauet for forholdet dengang vævet var levende, kan vi derfor regne baglæns og finde dødstidspunktet (fældningstidspunktet hvis der er tale om træ). Men kan vi sige noget om udgangsniveauet?

Den simpleste antagelse er, at det har været konstant gennem tiderne! Men Libby var godt klar over, at det er en meget dristig og problematisk antagelse. I første omgang kan vi se på forholdet mellem kulstof 14- og kulstof 12-isotoperne i atmosfæren. Er dette forhold konstant? Er det det samme over alt på Jorden? Er det det samme, når vi går tilbage i tiden, hvis vi fx nøjes med at gå 50000 år tilbage i tiden (som er det tidsrum, hvor metoden kan bruges i praksis)?

Den radioaktive isotop C-14 dannes højt oppe i atmosfæren som følge af den kosmiske stråling. Men den kosmiske stråling er ikke konstant. Den varierer med solaktiviteten (solpletterne) og med ændringer i Jordens magnetfelt (der skærmer for den kosmiske strålings indflydelse). Magnetfeltets afskærmning afhænger også stærkt af breddegraden, jfr. det faktum at Nordlys netop optræder hyppigt ved polerne. Af samme grund dannes der meget mere radioaktivt C-14 i områderne ved polerne end ved ækvator. Endelig dannedes den radioaktive isotop C-14 også i 1960'erne som følge af atombombesprængninger i atmosfæren, jfr. den følgende figur:



### Øvelse 6

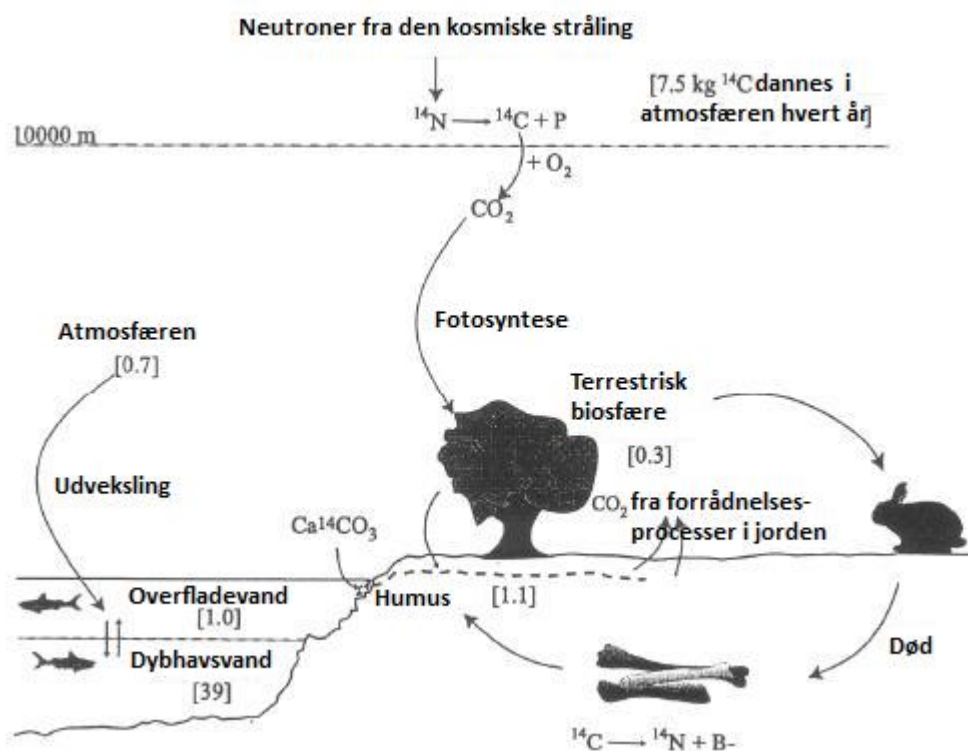
- Hvilke variable indgår i grafen?
- Hvor mange gange større var indholdet af radioaktivt kulstof 14 i midten af 1960'erne end i 1890?
- Hvornår begyndte man at lave atombombesprængninger i atmosfæren? Hvornår stoppede man igen? Afspejles dette i figuren?

## Kulstofkredsløbet

Tilbage til Libby omkring 1950. Libby vidste altså godt, at dannelsen af radioaktivt kulstof 14 varierede både i tid og alt efter, hvor man var på jorden. Atmosfæren ville formentlig hurtigt indstille sig på en ligevægt, så niveauet blev det samme overalt på jorden. Men hvis kulstofkredsløbet kun bestod af atmosfæren og biosfæren, ændres dette kredsløb kraftigt, fx når der kommer istider. Libby håbede på, at havet kunne regulere for sådanne udsving. Havet kunne rumme langt mere kulstof end atmosfæren og biosfæren, så hvis bare udvekslingen mellem atmosfæren og havene var rimeligt effektiv, ville havet kunne virke som en buffer, der holdt niveauet rimeligt konstant over tid.

### Øvelse 7

På den følgende figur kan du se en moderne gengivelse af kulstofkredsløbet, der viser hvor mange tons radioaktivt kulstof 14, der findes i de forskellige reservoirer:



Figuren er lånt fra Physics Methods in Art & Archeology, Notre Dame University

- Hvor mange tons radioaktivt kulstof 14 er bundet i havene?
- Hvor mange tons radioaktivt kulstof 14 er bundet i atmosfæren og den terrestriske biosfære?

*Bemærkning.* Du kan lære mere om hvordan man regner på sådanne kredsløb i projekt 4.6, *Minamata-katastrofen – En modellering af ligevægt mellem lineær og eksponentiel vækst.*

## Er niveauet af radioaktivt kulstof 14 stabilt?

Libby antog, at niveauet for radioaktivt kulstof 14 i levende væv har været rimeligt konstant overalt på jorden over de sidste 50 000 år. Selv om han ikke kunne vide om hypotesen var korrekt, ville han kunne understøtte den med nogle forholdsvis tilgængelige data, som vi gennemgår nedenfor.

### 1.

For det første kunne han måle på aktiviteten af forskellige nutidige prøver. Her er en tabel over resultaterne fra en sådan serie af målinger:

Kilde	Højde over havets overflade (feet)	Magnetisk breddegrad (positiv på nordlig halvkugle, negativ på sydlig halvkugle)	Absolut specifik aktivitet (dpm/g)	Usikkerhed
White Spruce, Yukon	0	60	14.84	0.30
Norwegian spruce, Sweden	0	55	15.37	0.54
Elm wood, Chicago	0	53	14.72	0.54
Fraximus exelcior, Switzerland	0	49	15.16	0.30
Honeysuckle leaves, Oak Ridge, Tennessee	0	47	14.6	0.30
Pine twigs and needles, Mount Wheeler, New Mexico	12000	44	15.82	0.47
Norht African Briar	0	40	14.47	0.44
Oak, Sherafur, Palestine	0	34	15.19	0.40
Unidentified wood, Teheran, Iran	0	28	15.57	0.34
Fraximus mandshurica, Japan	0	26	14.84	0.30
Unidentified wood, Panama	0	20	15.94	0.51
Clorophora excelsa, Liberia	0	11	15.08	0.34
Sterculia excelsa, Copacabana, Bolivia	9000	1	15.47	0.50
Ironwood, Majuro, Marshall Islands	0	0	14.53	0.60
Unidentified wood, Ceylon	0	-2	15.29	0.67
Beech wood, Tiera del Fuego	0	-45	15.37	0.49
Eucalyptus, New South Wales, Australia	0	-45	16.31	0.43
Seal Oil from seal meat from Antarctic	0	-65	15.69	0.30

Kilde: Libby (1955), *History of radiocarbon dating*



**Øvelse 8**

- a) Synes der at være en sammenhæng mellem den magnetiske breddegrad og aktiviteten?
- b) Synes der at være en sammenhæng mellem højden over havets overflade og aktiviteten?
- c) I hvilket omfang støtter tabellen Libbys antagelse om at aktiviteten er den samme overalt på Jorden?

**2.**

For det andet kunne Libby måle på aktiviteten fra forskellige rester af træ, der var gået ud ved starten af den sidste store istid:

Land	Sted	Anslået kulstof 14-alder (fvt)	Usikkerhed
USA	Two creeks	10877	740
USA	Two creeks	11437	770
USA	Two creeks	11097	600
USA	Two creeks	12168	1500
USA	Two creeks	11442	640
Tyskland	Allerød	11044	500
England	Allerød	9861	500
England	Godwin	10851	630
Irland	Irish mud	11310	720

Kilde: Libby, History of radiocarbon dating.

Den anslåede alder er beregnet under forudsætning af hypotesen om aktiviteten for levende væv er den samme overalt på Jorden i de foregående 50 000 år.

**Øvelse 9**

I hvilket omfang støtter tabellen Libbys hypotese?

**3.**

Endelig kunne han sammenholde aktiviteten af radioaktivt kulstof 14 fra fx museumsprøver med den historiske alder anslået ud fra fx historiske kilder. Både aktiviteten og den anslåede alder er behæftet med en vis usikkerhed som vi ignorerer i den følgende tabel.

Oprindelse	Anslået historisk alder	Aktiviteten af prøven i forhold til aktiviteten i nutidigt levende væv
Træringe	830	89.2
Træringe	1330	87.9
Pompei	1870	79.0
Bibelsk	2000	78.2
Tayinat	2650	72.9
Redwood	2950	71.3
Setl	3300	68.4
Sesostris	3800	63.6
Aha-nakht	3900	63.2
Sneferu	4650	60.1
Sneferu	4650	57.6
Hemaka	4975	56.4
Zet	4975	55.0
Hemaka	4975	54.6

Kilde: Tallene er baseret på en graf i Libby, History of radiocarbon dating

**Øvelse 10**

- Fremstil et diagram, der viser aktiviteten som funktion af den historiske alder.
- Hvilken sammenhæng burde der gælde mellem disse to variable, hvis Libbys hypotese var korrekt?
- Understøtter diagrammet Libbys hypotese?

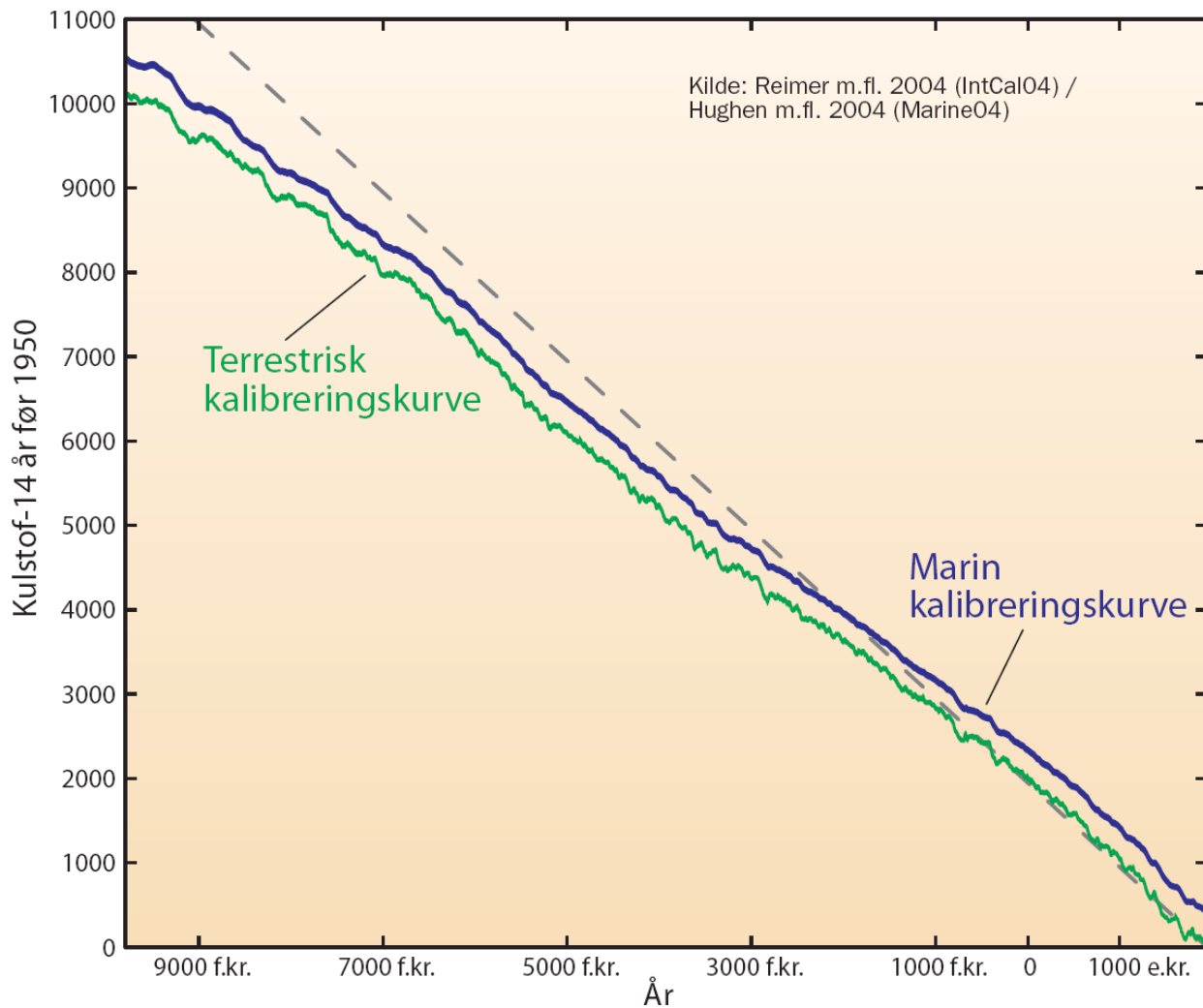
I dag ved vi at Libbys hypotese skal tages med et gran salt! Der er væsentlige variationer i aktiviteten for radioaktivt kulstof 14 i levende materiale, og man er nødt til at tage højde for disse variationer. For det første må materialet ikke være 'forurenat'. Hvis man fx måler på aktiviteten af væv fra kaniner fanget i nærheden af motorveje er ligevægten alvorligt forrykket af udstødningsgasserne fra bilerne på motorvejen!

**Øvelse 11**

- Hvor stammer udstødningsgasserne fra?
- Er der for meget eller for lidt radioaktivt kulstof 14 i disse kaniners væv?
- Hvilken konsekvens har det for deres anslåede alder (hvor fejlen er adskillige tusinde år!)?

**Kalibreringskurver**

Men selv om man ser bort fra sådanne oplagte forureningskilder er det vigtigt dels at tage hensyn til variationer i aktiviteten, når man går tilbage i tiden, dels at tage hensyn til om prøven stammer fra den terrestriske biosfære eller den marine biosfære. Det gøres ved hjælp af kalibreringskurver, der bl.a. udnytter, at man for rester af træ i nogle tilfælde kan finde den eksakte alder ved tælling af årsringe (dendrokronologi). I praksis udregner man derfor den alder prøven ville have haft, hvis aktiviteten i det levende væv havde været på 1950 niveauet - og halveringstiden havde været 5568 år (som er den halveringstid Libby og hans kolleger kom frem til). Dette skøn over alderen kaldes kulstof 14 alderen. Derefter slår man den virkelige alder op i en tabel eller aflæser den på en graf som den følgende:



Kilde: *Aktuel videnskab* nr. 4, 2008: *Isotoper fortæller om fortidens kost.*

### Øvelse 12

- Forklar hvilken sammenhæng den stiplede linje illustrerer.
- Forklar hvilken sammenhæng den terrestriske kalibreringskurve illustrerer.
- Hvilke korrigerede aldre får vi for de grønlandske mumier og Grauballemanden?