

C-14

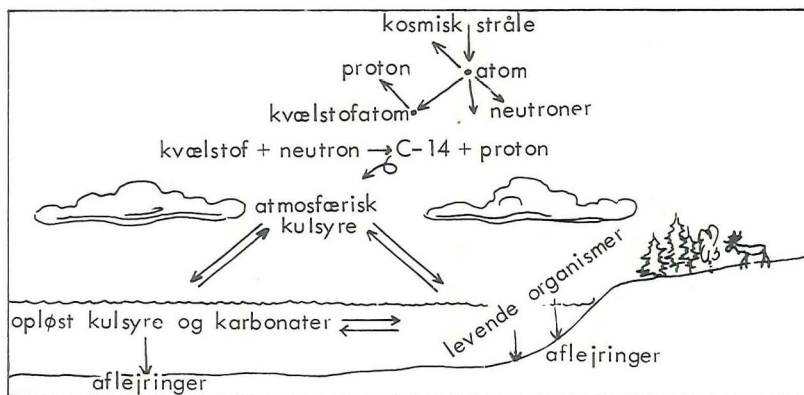
af Naja Mikkelsen

De tidligste forsøg på at aldersbestemme forhistoriske materialer blev gjort af danskerne Chr.J.Thomsen og Jens Jacob Worså i begyndelsen af 1800 tallet. På grundlag af arkæologiske fund opdelte de to videnskabsmænd Danmarks forhistorie i epoker og ordnede disse kronologisk, hvilket muliggjorde en relativ aldersangivelse. Først for cirka 25 år siden blev det omsider muligt i videre udstrækning af omsætte disse relative angivelser til absolutte aldre ved brug af de radiometriske aldersbestemmelser.

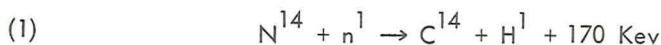
Grundlaget for radiometriske aldersbestemmelser er forekomsten af radioaktive isotoper i naturen. Disse isotoper er ustabile og til forskel fra de dertil svarende stabile isotoper (det vil sige atomer af samme grundstof men med forskellig masse) udsat for en stadig sønderdeling. Da sønderdelingshastigheden (halveringstiden) er karakteristisk for de enkelte isotoper, anvendes denne isotopegenskab til de "radioaktive dateringer".

Af alle de mange radioaktive isotoper, der i dag bruges til aldersbestemmelse, er kulstof-14 (C-14) isotopen nok en af de tidligst anvendte og derfor bedst udforskede isotoper.

Den radioaktive C-14 isotop med atomvægten 14 udgør kun en lille brøkdel af de øvrige inaktive C-12 og C-13 isotoper. I 1936 blev man på universitetet i Berkely opmærksom på, at der omkring C-12 atomet i grundstoffernes periodiske system manglede en isotop. Dette viste sig at være C-14 isotopen, som man efter mange eksperimenter i laboratoriet fik frembragt ad kunstig vej. I 1947 blev det påvist, at isotopen er naturligt forekommende i atmosfæren, idet de kosmiske strålers bombardement af kvælstofatomer fører til dannelsen af C-14 atomer og protoner efter ligningen



Figur 1. C-14 atomers dannelse i naturen. (Efter H.Tauber).



(1 kvælstofatom + 1 neutron \rightarrow 1 C-14 atom + 1 brintatom + energi)

Da man havde erfaret, at C-14 ikke blot kunne fremstilles kunstigt men også fandtes naturligt i atmosfæren, koncentreredes de videre undersøgelser om, hvad der skete med isotopen efter dannelsen.

W. F. Libby, grundlæggeren af C-14 dateringsmetoden fremsatte i 1947 den hypotese, at C-14 atomet umiddelbart efter dannelsen i stratosfæren oxideres (iltes) til kuldioxid (C^{14}O_2), der under opblanding med inaktivt kuldioxid (C^{12}O_2) føres ned til en lavere del af atmosfæren. Herefter kommer det til at indgå i det biologiske kredsløb. Dette danner dermed grundlaget for hele dateringsmetoden, thi så længe en organisme er levende, optages i et vist mængdeforhold aktivt såvel som inaktivt kuldioxid. Ved organismens død ophører tilførslen af kuldioxid og dermed tilførslen af nye C-14 atomer. Sønderdelingen af de allerede tilstedeværende atomer fortsætter imidlertid i det døde materiale, og det før konstante forhold mellem C-14 og C-12 vil ændre sig, efterhånden som antallet af C-14 atomer reduceres efter ligningen for radioaktivt henfald

$$(2) \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

hvor N_0 er antallet af oprindeligt tilstedeværende C-14 atomer, N er antallet af tilstedeværende C-14 atomer til tiden t , λ en omdannelseskonstant ($1,12 \cdot 10^{-4}$ per år) og t den søgte alder, som udregnes af formel 2.

MÅLEMETODEN

Det radioaktive henfald kan registreres i en tæller og dermed bruges til datering under forudsætning af at følgende 3 antagelser er korrekte:

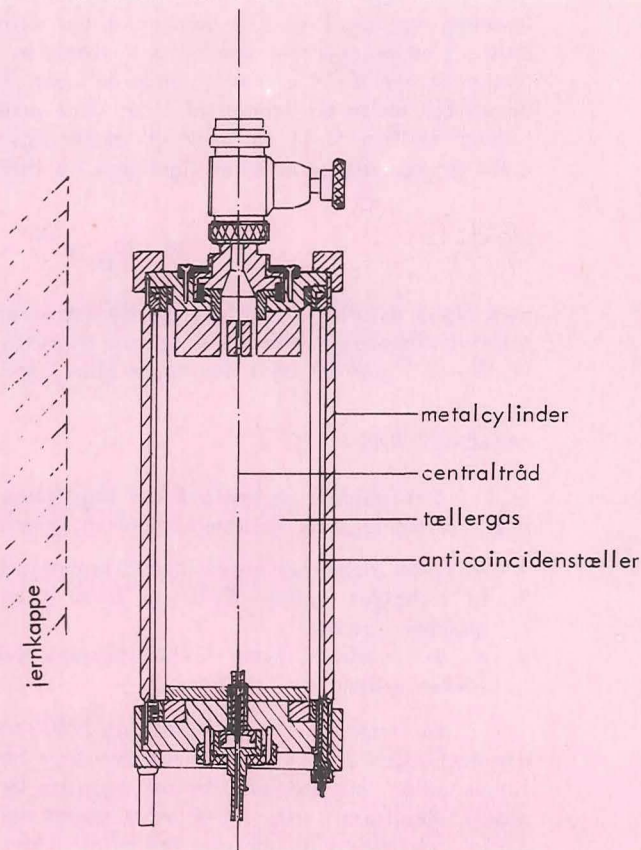
1. at C-14 atomernes halveringstid er nøjagtigt bestemt.
2. at forholdet mellem C-12 og C-14 i atmosfæren har været konstant gennem tiderne.
3. at det kredsløb, hvori C-14 atomerne deltager, kan betragtes som et lukket system.

Da metoden i begyndelsen af 1950'erne blev almen kendt, mødtes den med nogen skepsis. For at afprøve dens holdbarhed blev de første målinger udført på gravfund fra et ægyptisk dynasti med en historisk kendt alder. Resultatet viste sig at være meget nær det forventede og man gik derfor videre med at udbygge tælle-teknikken.

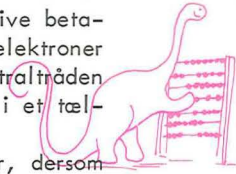
Mens man endnu var ved de indledende forsøg hændte det iøvrigt, at en kontroldatering af en museums-genstand gav et stærkt afvigende resultat. C-14 dateringens modstandere fik således nye argumenter for metodens upålidelighed. En nøjere undersøgelse viste imidlertid, at C-14 dateringen var korrekt, da det benyttede materiale var et falsum. Metodens anvendelighed blev nu hurtigt fastslået, og arbejdet med at forbedre måleteknikken kunne fortsættes.

Mens prøvematerialet i de tidligst konstruerede tællere måtte reduceres til rent kulstof inden målingerne, anvendes i dag overvejende "gastællere", hvor prøven findes i form af en luftart. Gastælleren er principielt opbygget af en tynd centraltråd, der har en stor positiv spænding i forhold til den omgivende metalcylinder (figur 2). Ved en naturlig sønderdeling i prøvegassen, der omgiver centraltråden, spaltes et C-14 atom

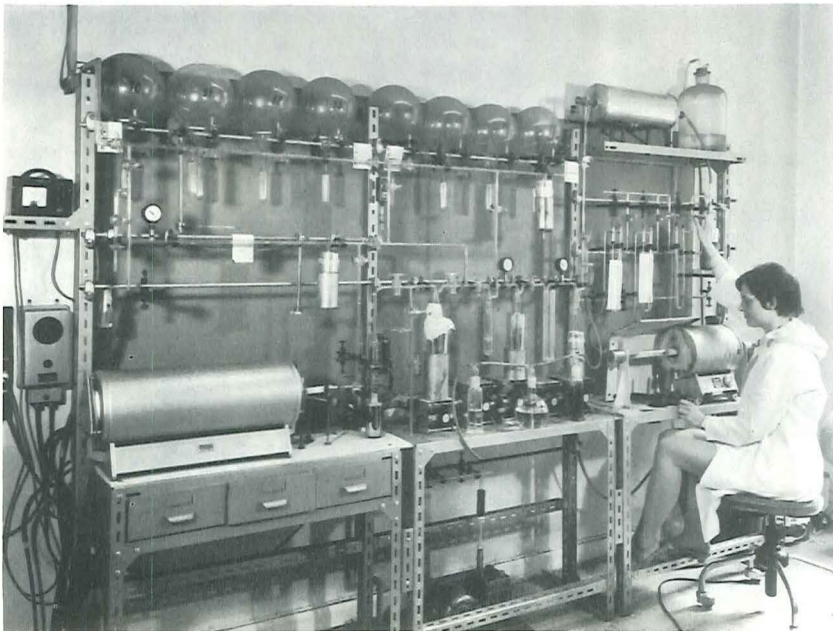
Figur 2. Den principielle opbygning af en C-14 tæller. En 20 cm tyk jernkappe omgiver tælleren for at forhindre de kosmiske stråler i at trænge ind i tælleren og forårsage falske impulser. Da jernkappen imidlertid ikke er i stand til at standse samtlige stråler, er der indbygget en speciel tæller, en anticoincidenstæller, der modvirker registrering af de udefra skabte impulser. (Efter Oeschger).



i et kvælstofatom og en negativt ladet partikel (beta-partikel) under frigørelse af energi. På grund af spændingsforskellen vil den negative beta-partikel trækkes mod centraltråden og under sin bane rive andre elektroner med sig. I det denne sky af negativt ladede partikler når centraltråden falder spændingen et kort øjeblik over denne, hvilket registreres i et tælleværk.



Med en gastæller kan man i dag opnå pålidelige resultater, dersom prøvematerialet er yngre end cirka 50000 år. I forhold til C-14 atomernes halveringstid på cirka 5700 år, er dette et meget langt åremål. I gamle prøver vil der derfor kun være en lille brøkdel af det oprindelige, radioaktive kulstof tilbage, og samtidig en større fare for forurening med recent (nutidigt) kulstof. Dette nødvendiggør, at prøvematerialet skal behandles særdeles omhyggeligt under oparbejdningen til gasform. På Kulstof-14 laboratoriet i København foregår denne oparbejdning og rensning af prøven i lukkede systemer (figur 3). Herfra kan prøvegassen ledes ind i tælleren, hvor henfaldet af kulstofatomer registreres og bruges til udregning af prøvens alder efter ligning (2).



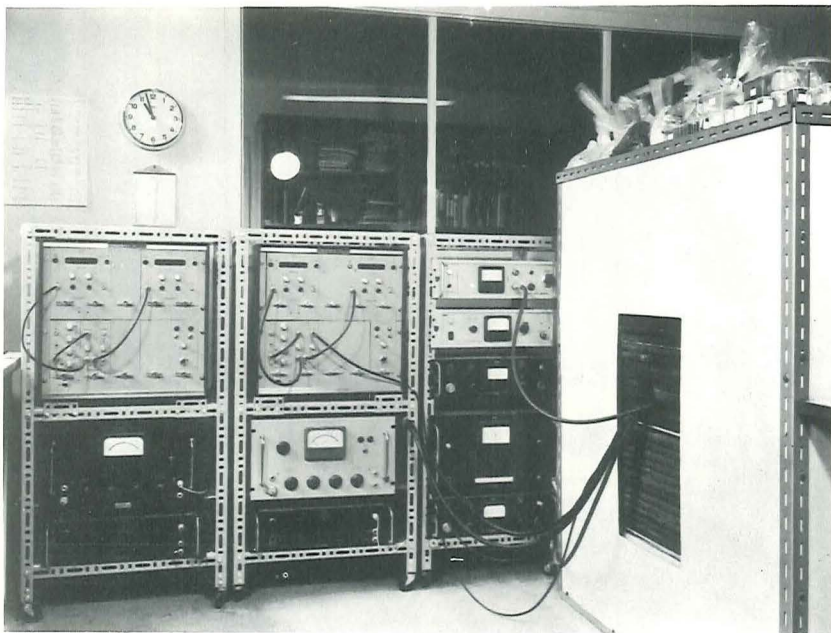
Figur 3a. Præparationssystemet på C-14 laboratoriet i København. Ved forskellige reaktioner omdannes prøven her til luftarten kuldioxid, som ledes over i tælleren.

USIKKERHED

De seneste års intensive arbejde med at forbedre metoden har vist, at de radioaktive aldre man finder for materiale af historisk kendt alder ikke altid stemmer med prøvens faktiske alder. Dette har bevirket en nøjere undersøgelse af afvigelserne, som har vist, at de 3 forudsætninger, man ved metodens anvendelse måtte anse for at være opfyldt, alligevel ikke er fuldt korrekte. Afvigelserne skyldes dels at den først beregnede halveringstid på 5570 år i virkeligheden er 5730 år, dels at forholdet mellem C-14 og C-12 ikke har været konstant gennem Jordens historie som først antaget.

Den fysiske årsag til koncentrationsændringen kan delvis forklares som et udslag af den industrielle udviklings forbrænding af kul og olie, der har frigjort en stor mængde inaktivt kul til atmosfæren.

Den nævnte faktor har imidlertid haft en relativt lille effekt på atmosfærens isotopforhold, hvilket tyder på, at det er langt mere indflydelsesrige faktorer, der inden for de sidste årtusinder har bevirket variationerne i C-12/C-14 forholdet. Eftersom man antager, at den kosmiske



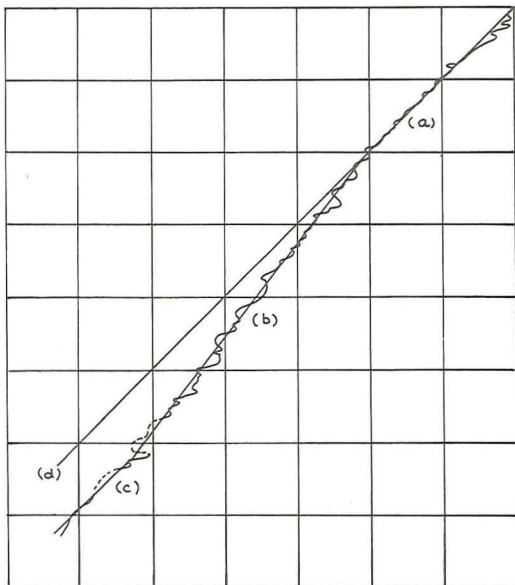
Figur 3b. Til højre på billedet ses C-14 laboratoriets tæller, hvorfra elektriske forbindelser leder impulserne over til det elektroniske tællerværk.

stråling i vor galaxe har været konstant gennem tiderne, er den mest sandsynlige årsag til variationerne nok ændringer i Jordens magnetfelt. Dette felt menes at opstå som følge af strømninger i Jordens flydende jernkerne, og dets styrke har varieret gennem Jordens historie. Ændringer i jordfeltets styrke og variationerne i C-14 aktiviteten viser sig at være samtidige, hvilket skyldes jordfeltets afbøjende virkning på de kosmiske stråler.

KORREKTIONEN VED DENDROKRONOLOGI

Den oprindelige antagelse om et konstant C-12/C-14 forhold må altså revideres og samtlige tidligere aldersbestemmelser korrigeres ved hjælp af en kalibreringskurve over C-14 aktivitetens variation gennem tiderne.

Af grundlæggende betydning for denne kalibreringskurves frembringelse er træ-årringskronologien, dendrokronologien, der bygger på, at træer i de fleste klimaområder hvert eneste år lægger en årring til deres tykkelse. Cellerne, der indgår ved dannelsen af disse årringe, optager atmosfærens CO₂, og da disse celler ikke udskiftes senere, har man i årringene arkiveret CO₂ fra hvert eneste af de år træet har levet.



Figur 4. C-14 dateringen af årringe (af "Bristel cone pine" = en fyrre-
 art) sammenlignet med årringenes korrekte absolutte alder (d). Den
 bugede kurve er en tilnærmet kalibreringskurve for C-14 datering.
 Middelfafvigelsen mellem C-14 aldre og træringens aldre er angivet ved
 de rette linier (a), (b) og (c). (Suess og Tauber).



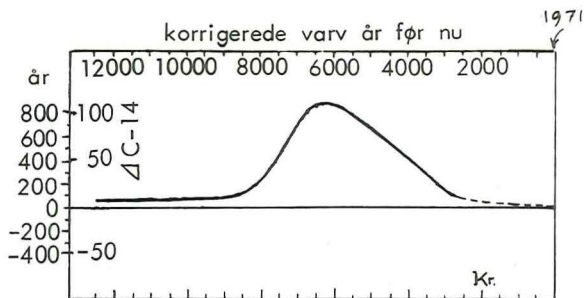
I Amerika findes nogle endnu levende 2-3000 årige kæmpefy, som har været anvendt til kalibrering af C-14 skalaen. Ved at fælde et træ og tælle årringe, har man kunnet fastslå en korrekt, absolut alder for hver eneste af disse årringe i stubben. Afviger en C-14 bestemt alder fra den korrekte alder på samme årring, skyldes dette en afvigelse ved C-14 dateringen, på grund af C-14/C-12 forholdets ændringer i atmosfæren. Afvigelsen mellem C-14 aldre og absolutte aldre kan for hver enkelt årring indtegnes i et diagram og dermed vise, hvor meget en given C-14 alder på en ukendt prøve skal korrigeres (figur 4).

Ved fund af nogle små og uanseelige nåletræer i Californien, er der for nylig åbnet yderligere muligheder for kalibrering af C-14 skalaen betydeligt længere tilbage i tiden. Nogle af de levende småtræer er 4600 år gamle og har karakteristiske årringe, som korreleres med årringe i fundne træer af endnu ældre dato. Ved videre korrelering bagud tilvejebringes dermed mulighed for at kalibrere skalaen til cirka 5500 f.Kr. og inden for de næste år er der håb om at nå yderligere 1500 år tilbage.

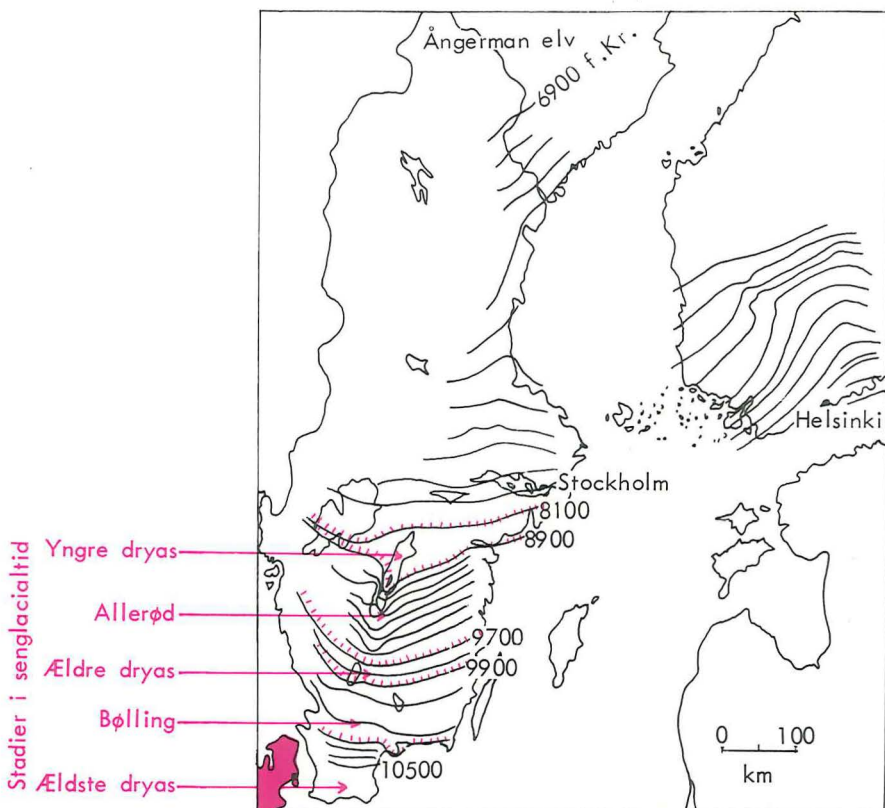
KORREKTIONEN VED VARVKRONOLOGI

Varvkronologien udgør en anden mulighed for kalibrering af C-14 skalaen tilbage i tiden. Aflejringer med varv består af regelmæssigt vekslende lag af finkornet sand og ler (se Varv nr 2, 1967).

Varvene, der er afsat i en sø, dannes på grund af en skiftet mellem tøj og frost og afspejler derfor en årsrytme. Dette anvendte den svenske forsker Gerhard De Geer til at etablere en varvkronologi og til at fastlægge tilbagesmeltningen over Syd- og Mellemsverige af den iskappe, som under sidste istid havde dækket det meste af Danmark. Det var muligt for De Geer at få etableret en relativ kronologi på cirka 10000 år, men ikke at få varvene absolut dateret, da de yngste varv fandtes i Ångermanelvens område (se figur 6) dækket af senere aflejringer og hævet op over nuværende havniveau. Nyere studier af De Geers varvarbejde fra 1930'erne har gjort det muligt, at få de enkelte varv absolut dateret (figur 6) og dermed givet et nyt kalibreringsgrundlag for C-14 skalaen. Skal varvkronologiske aldre og C-14 aldre sammenlignes må dette på grund af faren for sekundært tilført organisk materiale til varvene imidlertid gøres inddirekte. Sammenligning foretages derfor af C-14 daterede pollenzoner i moser med tilsvarende zoner i de ved varvkronologien daterede varv.



Figur 5. C-12/C-14 forholdets afvigelse, $\Delta C-14$ fra den ved 0-linien markerede værdi i dag. Afvigelserne har et maximum omkring 4000 år f.Kr., hvor alle C-14 aldre derfor skal korrigeres med op til 800 år. (Frit efter H.Tauber).



Figur 6. Iskappens tilbagesmeltning over Syd- og Mellemsverige efter sidste nedisning med angivelse af israndsstadier og absolutte aldre for de til afsmeltningen hørende varv. (Efter H.Tauber). Ifølge H.Taubers nyeste undersøgelser skal aldre forøges med 200 år.

Ved at sammenligne et bestemt varvs absolutte alder med den tilsvarende C-14 alder, vil der i visse tidsafsnit vise sig uoverensstemmelser på tilsvarende måde som ved dendrokronologien. Som vist ved figur 5 er disse uoverensstemmelser, det vil sige afvigelser fra C-14 aktivitetens størrelse i dag, især udpræget i tidsrummet 6000 - 1000 f.Kr. Der er et udtalt maximum omkring år 4000 f.Kr. Et svagt magnetfelt, og en derfor følgende kraftig kosmisk stråling har bevirket, at alt levende, organisk materiale i dette tidsrum har optaget for meget radioaktivt kulstof. En radioaktiv datering vil derfor give for ung en alder, hvilket nødvendiggør en korrektion ved hjælp af kalibreringskurven.

C-14 DATERING I GEOLOGIENS TJENESTE

I de cirka 25 år den radioaktive C-14 metode har været anvendt, har den løst mange problemer - i begyndelsen især af arkæologisk art. Metoden er imidlertid også taget i geologiens tjeneste nu. Herved har det været muligt for eksempel at få hele den sen- og postglaciale udvikling i Danmark fastlagt på basis af dateret materiale fra søer og moser. Tidspunkter for havsænkning og havstigning kan bestemmes ved datering af muslingeskaller fra forskellige niveauer på land. Således har man på grundlag af daterede skaller i Vendsyssel kunnet fastlægge havets bevægelser efter istiden ganske nøje. Ligeledes har det ved datering af skaller været muligt at rekonstruere Grønlands hævningsforløb, da sidste istids kuldeperiode afsløstes af varmere tider.

På Island har C-14 metoden blandt andet fundet anvendelse ved datering af vulkanen Heklas forskellige udbrud, da en lavastrøm fra et udbrud afbrænder vegetationen under fremrykning. En datering af de forkuldede rester umiddelbart under en lavatunge giver dermed tidspunktet for lavaens udbrud.

Indenfor hydrogeologien finder den radioaktive kulstofmetode praktisk anvendelse ved vandefterfølgning. Afhængigt af vandets surhedsgrad, vil en vis mængde kuldioxid være opløst og dermed en vis mængde C-14 til stede. Dateres en funden vandforekomst, vil det oplyses, hvorvidt der er tale om "gammelt" vand, det vil sige vand fra et reservoir, der ved tapning ikke vil fyldes igen og derfor ikke har særlig interesse.

I øjeblikket arbejdes der på alle kulstof-14 laboratorier verden over for at forbedre og udbygge den meget anvendte C-14 dateringsmetode. Helt nye former for datering er samtidig ved at fremkomme, men trods dette vil C-14 metoden sikkert i fremtiden indtage en lige så central plads som hidtil blandt de radioaktive dateringsmetoder, der kan være med til at øge vor viden om Jordens forhistorie.

Naja Mikkelson