

Fyrirlestrar

Minningarsjóðs Ásu Guðmundsdóttur Wright

The Ása G. Wright Memorial Lectures

IX

Dr. Ingrid U. Olsson

KOL-14 DATERING

Metoden och diskussion av speciella problem
med isländska prov och redovisning av två serier
dateringar av arkeologiskt material



ÞJÓÐMINJASAFN ÍSLANDS
NATIONAL MUSEUM OF ICELAND

1997

Bilder på omslaget

1. *Provuttagning från borkärna för pollenanalys (1982)*
2. *Námaskarð, Ísland (1971)*
3. *Asklager, Ísland (1971)*
4. *Del av förbränningsapparaturen (1957)*
5. *Del av mätelatroniken (1984)*
6. *Tre proportionalräknerör och jämförelsekärllet för tryckmätning utdragna ur skyddet (1969)*
7. *Flytande näckrosblad och submersa växter, Gillfjärden, Uppland, Sverige (1983)*
8. *Långa Getsjön, Kolmården, Sverige, med strandvegetation som assimilerar koldioxid ur atmosfären (1979)*
9. *Siggeforasjön, Uppland, Sverige med bladvass och Lobelia dortmanna, vilken tar koldioxid ur sedimentet genom rötterna (1983)*

© 1997 Minningarsjóður Ásu G. Wright

ISBN 9979-9005-5-5

Ísafoldarprentsmiðja ehf.
Bókbandsstofan Flatey hf.

Fyrirlestrar

Minningarsjóðs Ásu Guðmundsdóttur Wright
The Ása G. Wright Memorial Lectures

IX

Dr. Ingrid U. Olsson

KOL-14 DATERING

Metoden och diskussion av speciella problem
med isländska prov och redovisning av två serier
dateringar av arkeologiskt material



ÚTGEFANDI
ÞJÓÐMINJASAFN ÍSLANDS
NATIONAL MUSEUM OF ICELAND

Dr. Ingrid U. Olsson er fædd 1927 í Ludvika í Svíþjóð. Hún varð stúdent í Uppsölum 1946, las síðan náttúruvísindi og hóf störf 1951 við Eðlisfræðistofnun Uppsalaháskóla, þar sem hún hefur enn starfsaðstöðu þótt hún hafi látið af opinberu starfi.

Hún varði doktorsritgerð sína "*A study of some problems connected with C-14 dating*" árið 1962. Árið 1974 varð hún prófessor í efninu "*isotopgeofysik með sárskild tillämpning på kvartär kronologi*". 1956 kom hún upp rannsóknarstofu fyrir C-14 aldursgreiningar í Uppsölum og síðan hefur starf hennar einkum beinætt að mismunandi grundvallarþáttum C-14 greiningaraðferðarinnar, vandamálum hennar og aðlögun.

Ingrid hefur verið virkur þátttakandi í rannsóknum jarðlaga á Íslandi og hefur gert margar aldursgreiningar kolefnis héðan, ekki sízt á fornleifum og jarðlögum sem tengjast byggðarsögu landsins. Hún fær orð fyrir að vera vandaður og gagnrýninn vísindamaður og eiga íslenskir fræðimenn henni miklar þakkir upp að inna.

Dr. Ingrid U. Olsson flutti þennan fyrirlestur á vegum Minningarsjóðs Ásu G. Wright í Lögbergi 18. apríl 1990.

Á titilsíðu og bakhlíð kápu bæklingins er stafurinn W, tekinn eftir upphafsstaf í ættarnafni frú Ásu og manns hennar Henry Newcome Wright, eins og stafurinn er á samovar, sem hún gaf Þjóðminjasafni Íslands.

Elsu G. Vilmundardóttur jarðfræðingi við Orkustofnun eru færðar sérstakar þakkir fyrir aðstoð við útgáfu fyrirlestursins.

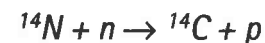
Innehållsförteckning

<i>Inledning</i>	7
<i>Mätning av ¹⁴C</i>	11
<i>Isotopfraktionering</i>	16
<i>Förbehandling av prov</i>	21
<i>Statistik</i>	28
<i>Reservoarålder och närliggande problem</i>	33
<i>Globala ¹⁴C-variationer förorsakade av människan</i>	36
<i>Globala naturliga ¹⁴C-variationer</i>	39
<i>Kalibrering</i>	44
<i>¹⁴C i vulkaniska områden</i>	48
<i>Den låga ¹⁴C-aktiviteten i arktiska områden</i>	51
<i>Internationella jämförelser och felgränsernas reella betydelse</i>	53
<i>Allmänna synpunkter på tolkning av ¹⁴C-resultat</i>	54
<i>Referenser</i>	61

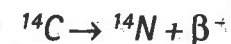
Inledning

Fysikalisk bakgrund

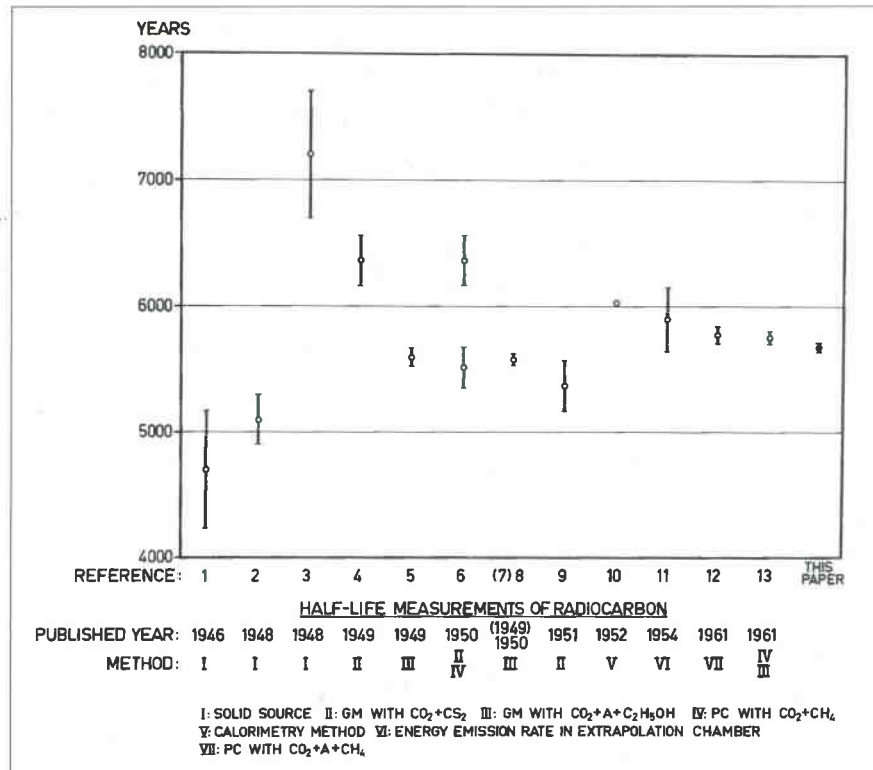
Det var för drygt 40 år sedan som W. F. Libby visade att man kan datera organiskt material med hjälp av den radioaktiva isotopen kol -14 (^{14}C). Grundämnet kol ingår i allt organiskt material. Det finnes tre isotoper: ^{12}C , ^{13}C och ^{14}C . ^{12}C är vanligast förekommande (98,9%) och ^{13}C därefter (1,1%). ^{14}C :s förekomst är blott ungefär $10^{-10}\%$. Isotoper av ett grundämne uppför sig kemiskt på samma sätt, men de har något olika massor, som anges av siffrorna 12, 13 och 14 i det aktuella fallet. Två av isotoperna ^{12}C och ^{13}C är stabila och den tredje är radioaktiv – d.v.s. den sönderfaller spontant. ^{14}C bildas kontinuerligt av den kosmiska strålningen genom neutroners inverkan på kväve enligt



och det radioaktiva kolet sönderfaller till kväve under emission av elektroner, β^- -partiklar



Halveringstiden är 5730 ± 40 år. Det betyder att aktiviteten går ner till hälften på 5730 år och till $(1/2)^6$ (= 1/64) på 6 halveringstider eller drygt 34.000 år. Aktiviteten går ned med 1% på ung. 80 år. När Libby först fann att ^{14}C kunde användas för datering fanns det inte något bra värde på halveringstiden. Efter några år hade ett antal bestämmningar publicerats (*Fig. 1*) och Libby beräknade ett medelvärde, 5568 ± 30 år,



Figur 1. Värden på halveringstiden publicerade från 1946 fram till 1962 ("this paper" är Olsson *et al.*, 1962).

ur tre av värdena. Det fanns anledning att misstänka att detta värde var för lågt och år 1961 och 1962 kom tre nya bestämningar. Dessa ligger till grund för det nya medelvärdet, som bör användas i fysikaliska sammanhang. Vid ¹⁴C-konferenserna år 1962 och 1965 i Cambridge och Pullman (Godwin, 1962; Olsson, 1968) kom man dock överens om att använda det gamla värdet, 5568 eller 5570 år, för beräkning av ¹⁴C-åldrar. Beslutet grundar sig främst på två orsaker:

- Man hade fått kunskap om att det förekom vissa variationer i den naturliga förekomsten av ¹⁴C och därmed blev forskarna medvetna om att ¹⁴C-åldrar måste kalibreras.
- Tusentals ¹⁴C-resultat hade publicerats beräknade med den gamla halveringstiden ($T_{1/2}$, ibland kallad Libby's halveringstid), 5568 år, och man fruktade sammanblandning av resultat beräknade med den gamla och den nya halveringstiden.

Tabell 1. De fyra senaste bestämningarna av halveringstiden för ¹⁴C. De tre första slutfördes 1961 och 1962 och ledde till beslut om ett värde 5730 ± 40 år att användas i fysikaliska sammanhang. Vid datering användes fortfarande värdet 5568 (eller 5570) år, eftersom kalibrering ofta kan utföras. Den fjärde bestämningen publicerades efter detta beslut

Laboratorium	Första värdet, år	Masspektrometer i första publikationen	Andra värdet, år	Masspektrometer i andra publikationen	Normaliserat till masspektrometern i Aldermaston
N.B.S., USA (Washington)	5760 ± 50	N.B.S. 1 & 2	5745 ± 50	N.B.S. 1, 2 & 3	5715
Aldermaston England	5780 ± 65	Aldermaston			5780
Fysiska inst. Uppsala, Sverige	5680 ± 40	Harwell	5685 ± 35	Harwell + Aldermaston	5695
Fysiska inst. Rom, Italien	5660 ± 30	Pisa			

Första och tredje laboratoriernas värden givna av de ansvariga med sannolikt fel
 Andra och fjärde laboratoriernas värden givna av de ansvariga med statistiskt fel

En tredje orsak fanns också: Det är en svår procedur att bestämma $T_{1/2}$ (Olsson *et al.*, 1962). Det beror bl. a. på en masspektrometrisk bestämning av ¹⁴C-innehållet i ett prov. En dylik absolutbestämning är ytterst svår att utföra. Efter denna bestämning måste provet spädas mycket kraftigt för att aktiviteten skall kunna bestämmas genom sönderfallsräkning. Man trodde också att nya halveringstidsmätningar kunde startas och ville undvika flera ändringar av värdet för beräkning av ¹⁴C-åldrar. En senare bestämning kom (Tabell 1) som också indikerade ett högre värde än det Libby beräknade i början av 50-talet.

Själva principen för ¹⁴C-metoden och problem som sammanhänger med metoden

Eftersom kol ingår i all organisk materia och deltar i den globala kolcykeln och ¹⁴C ständigt nybildas och sönderfaller, emedan det är radioaktivt, kommer levande växter och djur att innehålla en viss mängd ¹⁴C. När en planta dött, en årsring i ett träd fullbordats eller ett djur dött existerar inte längre något utbyte med omgivningen, om systemet är slutet. ¹⁴C försvinner genom sönderfallet, aktiviteten avklingar. Om man bestämmer kvarvarande mängd radioaktivt kol kan man med

känedom om halveringstiden beräkna hur lång tid som förflutit sedan utbytet med omgivningen upphörde. I första approximationen räknar man med att blandningen över jordytan är snabb, så att aktiviteten är densamma på olika platser. Libby (1955) var den första som frågade sig om detta var fallet och försökte besvara frågan genom en serie bestämningar, dels på samtida prov från olika delar av världen, dels på material med välkänd ålder. Med den tidens mätmetoder visade hans resultat att antagandet om en konstant aktivitet i levande materia över jordytan och under några årtusenden tillbaka i tiden var rimligt. Med förfinad teknik förbättrades noggrannheten och man insåg redan i mitten av 50-talet att aktiviteten inte varit konstant. Till en början talade man om avvikelser på några få procent, men nu har man mätt avvikelser från det "moderna" värdet på upp till ungefär 10% under Holocen och de kan vara än större tidigare, 30 till 10 tusen år tillbaka i tiden enligt Bard *et al.* (1990). I början av 50-talet fick man belägg för att den specifika aktiviteten kunde vara olika för olika reservoarer – lägre för åtminstone hav och vissa sjöar än för atmosfärisk koldioxid. Ett annat problem, som Libby pekade på, är hur ett prov skall väljas och förbehandlas för att föroreningar skall undvikas, vilka kan leda till ett falskt resultat. Även detta problem studeras fortfarande i många laboratorier.

Den fysikaliska skillnaden i massa hos isotoperna gör att en isotopfraktionering uppstår, så att de tyngre isotoperna anrikas – blir mer vanliga – i bikarbonatet när koldioxid löses i vatten och utarmas – blir mindre vanliga – i plantor när dessa assimilerar luftens koldioxid.

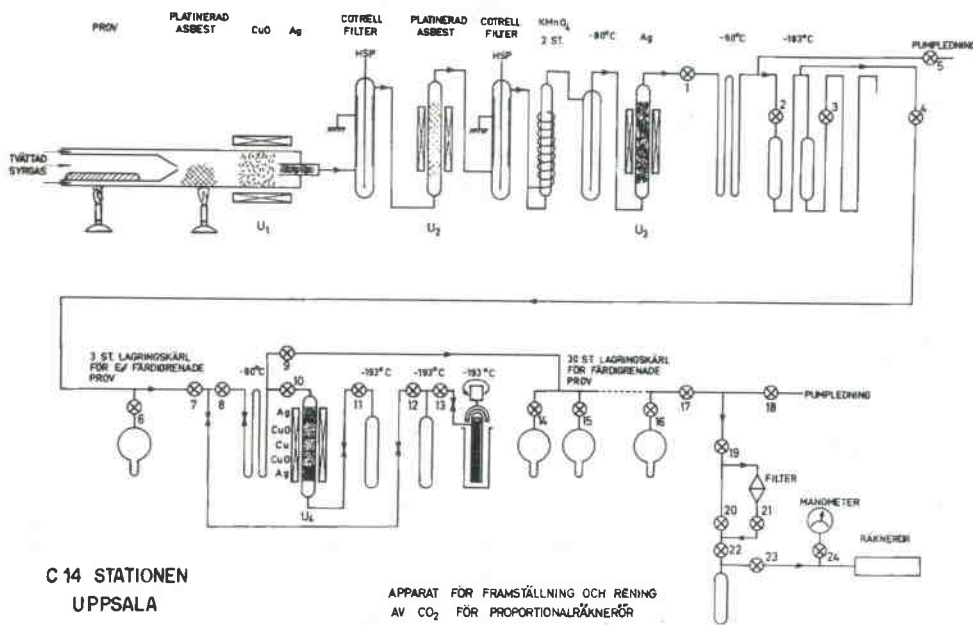
Den sista stora frågeställningen är huruvida ^{14}C -aktiviteten i atmosfären är densamma över hela jordklotet. Mätningar bl.a. på den avklingande aktiviteten efter atombombstesterna i början av 60-talet tyder på variationer. Detta är av stor principiell betydelse för den isländska kronologien och har varit föremål för systematiska studier i Uppsala sedan början av 70-talet.

Mätning av ^{14}C

På grund av den ringa förekomsten av ^{14}C i naturen och den långa halveringstiden måste detektorerna för mätning av aktiviteten placeras i speciella skydd, som tar bort den störande strålningen från omgivande byggmaterial och den kosmiska strålningen, om man använder den konventionella mätmetoden med sönderfallsräkning. Man kan också bestämma ^{14}C -halten med en kombination av masspektrometer och accelerator.

Libby startade sina mätningar med elementärt kol på insidan av ett Geiger-Müller-rör (Libby, 1955). Det var, något förenklat beskrivet, en cylinder med en tråd efter axeln med en spänning mellan tråd och vägg. Han införde också ett galler. Nu är β -strålningen, som sänds ut när ^{14}C sönderfaller, mycket mjuk, d.v.s. den absorberas lätt. Det lager kol som Libby använde sig av var tillräckligt tjockt för att strålningen från det understa kolet skulle absorberas helt – man säger att lagret är oändligt tjockt. Samtidigt blev effektiviteten mycket låg, eftersom större delen av strålningen absorberades, men Libby kunde få ganska reproducerbara mätresultat.

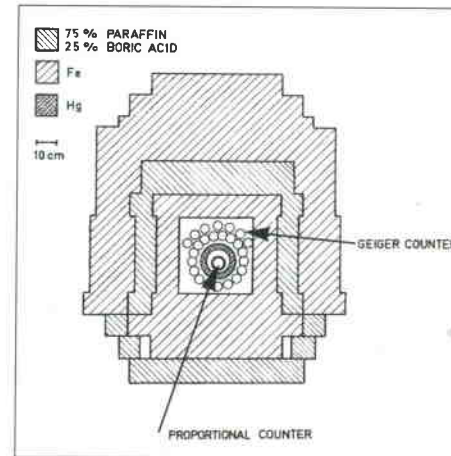
Vid sina första experiment hade Libby dock mycket svårt att mäta strålningen. Han utnyttjade t.o.m. anrikning av de tunga isotoperna i metangas från ett reningsverk för att kunna påvisa den naturliga aktivitet som han hade förutsett skulle vara mätbar. Han tog sedan upp en teknik från 30-talet för att „skydda” sin räknare (detektor för radioaktivitet) med hjälp av ett antal andra detektorer som ett paraply för att på elektronisk väg kunna sortera bort den kosmiska strålningens mesoner (muoner – den hårda komponenten). Han måste också omge sin räknare med ett tungt skydd för att absorbera gamma-strålningen (γ) från omgivningen. Libbys typ av räknare blev snart mycket svår att



Figur 2. Den ursprungliga reningslinjen i Uppsala för koldioxid byggd efter principer givna av de Vries *et al.*, i Groningen. De enda väsentliga ändringarna är att Cottrellfiltret tagits bort, att kaliumpermanganatlösningen i tvättflaskorna ersatts med kromsyra och att silvret i röret till höger om ugn 1 ersatts med vanadinpentoxid, blykromat och silver.

använda, eftersom kolet var aktivt och lätt adsorberade radioaktivt stoft, som spreds över jorden som en följd av atombombstester. Libby hade förbränt sina prov till koldioxid och sedan reducerat gasen till elementärt kol.

Det var naturligt att försöka använda koldioxiden direkt som provgas och fyllnadsgas i detektorn. Det var till en början svårt eftersom gasen måste vara mycket ren. Ett mycket fint utvecklingsarbete utfördes i tre laboratorier (Groningen, Heidelberg och Lower Hutt) i och med att man visade att ren koldioxid kunde användas vid övertryck i proportionalräknerör. Ett Geiger-Müller-rör ger pulser av lika storlek oberoende av energien hos strålningen. Ett proportionalräknerör ger pulser som är proportionella mot energien hos strålningen, som detekteras. Mest känt är utvecklingsarbetet i Groningen, där de Vries och hans medarbetare (de Vries och Barendsen, 1952, 1953 och 1954; Barendsen, 1955; de Vries, 1956 *a* och 1957 *a*) utredde villkoren för att mätning skulle



Figur 3. En schematiserad bild av skyddet i Uppsala. För enkelhetens skull har den ursprungliga bilden valts med enbart ett proportionalräknerör i nischen. Numera användes två rör, men plats finnes för ett tredje. Järnet reducerar γ -strålningen, ringen med G.M.-rör tillåter eliminering av den hårda komponenten i den kosmiska strålningen, mesoner eller muoner, genom antikoincidens-koppling i elektroniken. Paraffinet bromsar de neutroner som den kosmiska strålningens mjuka komponent producerat i järnet, varpå borsyrans fångar in dem under produktion av lågenergetisk γ -strålning, som lätt absorberas.

kunna utföras och konstruerade en kemisk reningslinje för koldioxid. Den användes i princip än i dag vid flera laboratorier, t.ex. det i Uppsala (Fig. 2). Problemet är i korthet att gasen måste vara mycket ren och speciellt måste elektronegativa föroreningar ha borttagits. Det beror på att dessa lätt tar till sig elektroner och bildar tröga negativa joner i stället för de lätttrörliga elektronerna. Exempel på dessa föroreningar är vatten, syre, svaveldioxid, halogener och kväveoxider. Vissa fångar man upp i kylfällor eller pumpar bort från nedfrusen koldioxid medan andra tas bort rent kemiskt.

Man behöver inte använda koldioxid utan kan använda metan, acetylen eller andra gaser. Så fort man har en gas som innehåller väte måste man vara försiktig och se till att gasen inte innehåller tritium. Man kan visserligen undvika tritiums β -strålning, som har mycket lägre maximal energi än det radioaktiva kolets, genom pulshöjdsdiskriminering, men då minskar effektiviteten samtidigt.

Efter en tid kom även scintillationsräknare i bruk. Vanligtvis överför man provet till bensen via acetylen. Den erforderliga provmängden är normalt större än för gasfyllda räknare.

Det enkla skydd som Libby använde har under tidernas lopp förbättrats i olika laboratorier. De största tidiga framstegen gjordes i Groningen genom att de Vries (1956 *b* och 1957 *b*) fann att den mjuka komponenten i den kosmiska strålningen, som producerar neutroner i skyddet, kunde elimineras genom att man byggde in ett lager paraffin med borsyra i skyddet. Paraffinets väte bromsar neutronerna, som i sin

tur fångas in av borsyrans bor och därvid ger upphov till lågenergetisk γ -strålning i stället för den högenergetiska som erhålles vid infångning i järnet. Den lågenergetiska strålningen kan då absorberas av relativt liten mängd järn. Detaljer ges av Olsson (1988). Den mjuka komponenten har ett barometerberoende som är cirka 6 gånger större än den hårda komponentens – mesonernas. Denna komponent reduceras med ung. $1/3$ i skyddet i Uppsala (Fig. 3). När laboratoriet flyttades från ett torn på institutionen nära yttertaget till en lokal i marknivå med tre laboratorievåningar och en vindsvåning ovanför reducerades mesonkomponenten med drygt $1/5$. Den mjuka komponenten, som trots ett bra skydd uppe i tornet visat ett barometerberoende för detektorns bakgrund, reducerades till synes helt och hållet. En detektor har alltid en viss bakgrund och den är i dagens läge drygt 0,9 respektive knappt 0,7 cpm (pulser per minut) för de i bruk varande två detektorerna. Uppe i tornet var den något högre för dessa två detektorer. Den minskade med knappt 0,04 cpm när barometerståndet ökade med 10 mm Hg (13 mbar) tack vare den ökade absorptionen i den tyngre luftpelaren. Om vi inte skyddat detektorn utan mått bakgrunden ute i laboratoriet utan något som helst skydd skulle bakgrunden ha varit 500 till 1000 cpm och dessutom långt ifrån konstant. Detta skall jämföras med att aktiviteten hos ett prov från förra århundradet är drygt 13 cpm för 1 g kol och att knappt 1 g kol i form av koldioxid går in i en räknare om 1/2 liter om den fylles till 3 atmosfärens tryck (3000 mbar). Om man betänker detta inser man lätt att det är synnerligen viktigt att man har en konstant bakgrund under långa tider för att kunna mäta gamla prov eller uppnå hög stabilitet eller noggrannhet.

Laboratorierna uppger statistiska felgränser, men i vissa fall är den reella osäkerheten större. Detta tages upp under en särskild rubrik.

För drygt 10 år sedan stod det klart att man skulle kunna räkna atomerna i stället för att räkna sönderfallen. En vanlig masspektrometer räcker inte till för detta även om man försöker med vissa trick som dubbelfokusering. Den stora innovationen var att man först grovsorterar kolets isotoper efter massan. Förutom det radioaktiva kolet har $^{13}\text{CH}_3$, $^{12}\text{CH}_2^-$ o.s.v. massan 14 så strålen är ingalunda "ren". Kväve, också med massan 14, slipper man i detta steg genom att negativa joner användes och kvävet negativa jon har en extremt kort livslängd. De negativa jonerna får sedan gå in i en accelerator av Van de Graaff-typ så de accelereras mot den positiva laddningen i mitten. Där berövas de ett par eller flera laddningar och stötes sedan bort genom andra halvan

av acceleratorn. Därefter sorteras jonerna igen i ett magnetfält och når till slut en detektor, som mäter totala energien och hur mycket energi som förloras på en viss vägsträcka i detektorn. Eftersom dessa, energien och energiförlusten, är specifika för olika ämnen och isotoper kan man sortera fram det man är intresserad av. Topparnas höjd för ^{12}C , ^{13}C och ^{14}C är nu av samma storleksordning om provet är modernt. God upplösning erhålles också.

Fördelarna med acceleratormätning är att själva mätningen går snabbt och att den erforderliga provmängden är mycket liten. Man räknar med i storleksordningen 1/1000 av vad som behövs för en vanlig konventionell mätning med gasfyllda detektorer. Förbehandlingen av proven, vilken diskuteras nedan, är lika viktig hur man än mäter ^{14}C -innehållet. Med acceleratormätning har man givetvis en möjlighet att välja ut en lämplig fraktion – t.ex. en aminosyra. Om ett prov är inhomogent bör man ibland råka ut för att få förhållandevis gamla eller unga komponenter. Normalt räknar man med att en acceleratormätning blir dyrare än en konventionell mätning. Om en accelerator finnes och ej längre lämpar sig för kärnfysikalisk forskning kan det bli mycket billigare med en ombyggnad än med ett nyinköp.

Isotopfraktionering

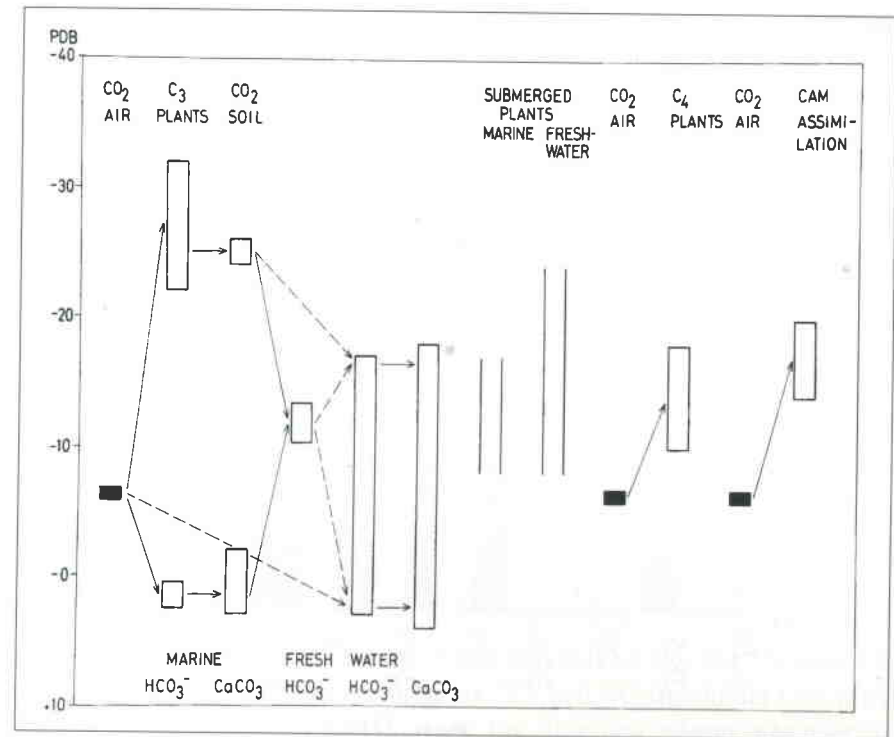
I atomernas mikrovärld har vi tre slags rörelser – translationsrörelse, rotationsrörelse och vibrationsrörelse. För en viss hastighet blir energien större ju större massan är och det är det som ligger bakom isotopfraktioneringen i naturen och även vid separation med hjälp av magnetfält och elektrostatiska fält. Hastigheten för en gas när den strömmar genom en kapillär blir också beroende av massan. Man talar om kinetiska och jämviktsprocesser. Koldioxidens upplösning i vatten är ett exempel på en jämviktsprocess och växternas assimilation på en kinetisk process. Den fraktionering som sker vid dessa processer är ganska liten och därför är avvikelserna från ett standardvärde ett lämpligt mått. Avvikelsen ges som ett δ -värde. Förhållandet mellan två isotoper kallas R , och R_o står för standarden och R_p för provet. Då gäller

$$\delta = (R_p/R_o - 1) \times 1000 = (R_p - R_o)/R_o \times 1000$$

$$R_p = (\delta/1000 + 1) \times R_o$$

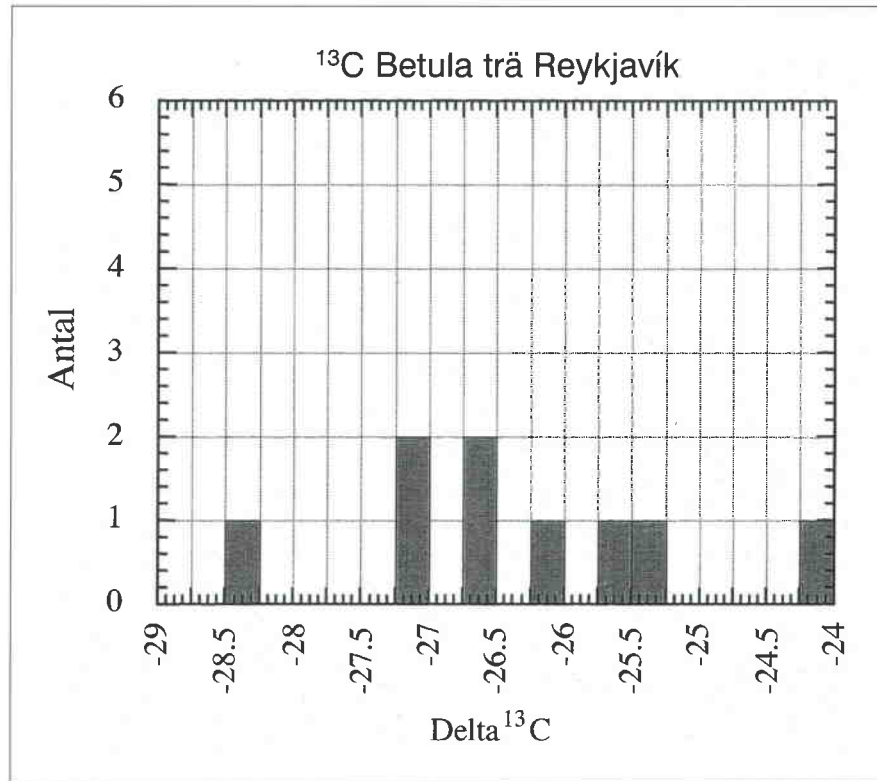
I kol-14-sammanhang har ett karbonat, en belemnit, valts som standard (*Belemnitella americana*, en mollusk från Peedee Formation i South Carolina). Detta förklarar beteckningen PDB efter δ -värdet. Det finnes flera andra standardprov, som användes i olika sammanhang. Eftersom PDB-standarderna inte längre kan erhållas användes i själva verket sekundära standardprov relaterade till PDB-standarderna.

Det måste noteras att ingen forskare hade en tanke på isotopfraktionering när ^{14}C -metoden just lanserats. Det dröjde några år innan man började tänka på konsekvenserna. Uppsala-laboratoriet, som utförde sina första bestämningar år 1957, var därför ett av de första



Figur 4. En kraftigt generaliserad bild av den naturliga fraktioneringen av ^{13}C (Olsson och Osadebe, 1974). Marina plankton saknas helt i diagrammet. De har som regel värden mellan -15 och -30 ‰. Den öppna boxen för marina växter bör snarare täcka intervallet -5 till -25 ‰ och inkluderar då alger. De lakustrina plantornas intervall bör utsträckas längre än till -30 ‰.

laboratorierna som rutinemässigt låtit utföra $\delta^{13}\text{C}$ -bestämningar på i det allra närmaste samtliga prov. Dessa leder till en korrigerig eller normalisering, som behandlas nedan. En sammanställning gjord till Nya Zeeland-konferensen år 1972 visade att bara 1/5 av laboratorerna hade utfört isotopkorrigerig i åtminstone en av sina listor publicerade i *Radiocarbon* fram till och med år 1971. Det var i själva verket först omkring år 1970 som man började förstå fotosyntesens vägar och grupperade de terrestriska plantorna i tre grupper: C_3 , C_4 och CAM-plantor. De flesta av våra plantor är C_3 -plantor och assimilerar enligt Calvin-cykeln. Majs är en C_4 -planta och assimilerar enligt Hatch-Slack-cykeln. Kaktusar, agave och ananas är exempel på växter som assimilerar enligt CAM (Crassulacean Acid Metabolism). Det är komplicerade processer, och man kan rimligtvis vänta sig ett temperaturberoende men också att δ -värdet beror på värdet för källan, växtslaget, arten, vilken del av plantan eller djuret som undersökes och vilka kemiska komponenter som extraheras.



Figur 5. $\delta^{13}\text{C}$ -värden för träprov från Reykjavik, av björk, daterade i Uppsala.

De tunga isotoperna anrikas när luftens koldioxid med ett δ -värde om ungefär -7‰ löses som bikarbonat, som får ett δ -värde omkring 0‰ , men utarmas vid assimilation. Värdet blir ungefär -25‰ för C_3 -plantor och ungefär -13‰ för C_4 -plantor och något däremellan för CAM-plantor. Vattenväxter ger ett komplicerat mönster. Kortfattat kan man säga att marina plankton som regel ger värden mellan -15 och -30‰ , lakustrina plantor med plankton undantagna snarare mellan -10 och -30‰ , marina plantor med plankton undantagna mellan -5 och -25‰ , alger (huvudsakligen marina) mellan -5 och -23‰ och vattenväxter som en hel grupp mellan -5 och -33‰ (Deines, 1980). Liknande värden finnes publicerade av andra författare. Submersa mossor har visat på underskott motsvarande -48‰ . Spridningen av resultaten visar att det kan vara ytterst svårt att av ett $\delta^{13}\text{C}$ -värde på ett sediment avgöra ursprunget.

Molluskskal och annat karbonat, som fälls ut i havsvatten, får ett

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -förhållande som är mycket nära det för bikarbonatet. När sådana kalker sedan löses upp erfordras antingen syror eller ett högt koldioxidtryck, såsom det som byggs upp i marken genom plantornas respiration genom rötterna. Det nybildade bikarbonatet kan då få näst intill vilket $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -förhållande som helst inom ett stort intervall ehuru man i första approximationen kan antaga att värdet blir ungefär lika med medelvärdet mellan 0 och -25 . Sötvattenskarbonater har därför ofta värden omkring -13‰ .

En förenklad bild gavs av Olsson i början av 70-talet. Ehuru icke reviderad återges den här (Fig. 4). På 60- och 70-talen var det ännu vanligt att publicera diagrammen med ökande negativa δ -värden åt höger utefter x-axeln eller uppåt utefter y-axeln. Numera försöker man använda det vanliga sättet. Det är tyvärr förvirrande med två sätt i litteraturen. Gulliksen (1980) har också presenterat diagram som visar typiska fördelningar av $\delta^{13}\text{C}$ -värden. I Fig. 5 ges en sammanställning av värden för björkved för prov från Reykjavik daterade i Uppsala.

Isotopfraktionering är en termodynamisk process och Craig (1954) slog fast att den bör vara nästan exakt dubbelt så stor för ^{14}C som för ^{13}C . Man måste också komma ihåg att ^{14}C - och ^{13}C -innehållet i ett prov återspeglar innehållet i källan, som för djur och växter närmast är atmosfärens koldioxid. Detta leder till att alla mätvärden bör normaliseras till ett och samma $\delta^{13}\text{C}$ -innehåll. Mätningar på marina skal och våra vanliga plantor ger enligt ovan normalt en skillnad på ungefär 25‰ i $\delta^{13}\text{C}$ och bör då ge en skillnad i $\delta^{14}\text{C}$ på 50‰ , vilket motsvarar 410 år.

Eftersom många laboratorier hade använt trä som standard vid ^{14}C -bestämningar, och man mycket ofta daterar trä, träkol eller andra växtrester av C_3 -typ, kom man överens om att normalisera alla ^{14}C -mätningar på prov till -25‰ i PDB-skalan. Marina skal göres sålunda omkring 410 år äldre vid beräkningarna för att kompensera för den naturliga fraktioneringen.

När oxalsyra från National Bureau of Standards accepterades som internationellt standardprov år 1959 på ^{14}C -konferensen i Groningen beslöt man samtidigt att man skulle normalisera denna oxalsyra till -19‰ , eftersom det var det normala värdet för oxalsyran (Craig, 1961). Nu finns en ny oxalsyrestandard.

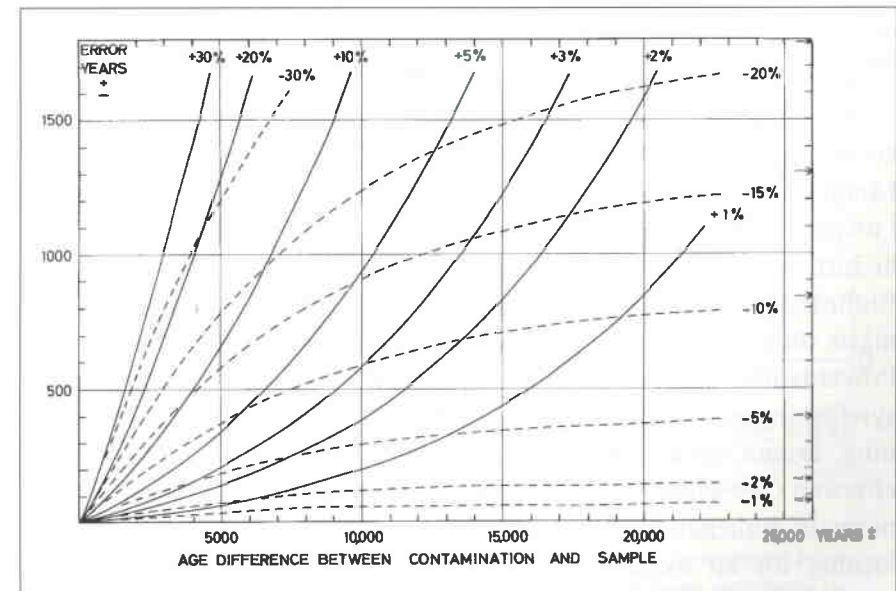
^{13}C -värdet kan ge en indikation om källan. Man har sålunda diskuterat matvanor hos våra förfäder med hjälp av mätningar på kollagen i ben. Van der Merwe och Vogel (1978) visade att introduktionen av majs i ett område i USA kunde dokumenteras med hjälp av ^{13}C . På liknande sätt

visade Tauber (1983) att danskar under Mesoliticum uppenbarligen hade ätit mycket fisk. Han observerade ett ^{13}C -innehåll som var mycket liknande det hos eskimåer. En annan nordisk undersökning har publicerats av Johansen *et al.* (1986). Det är dock inte tillrådligt att dra vittgående slutsatser av enbart $\delta^{13}\text{C}$ -värden. Man bör samtidigt studera andra ämnens isotoper. Kvävet's stabila isotoper är speciellt lämpliga.

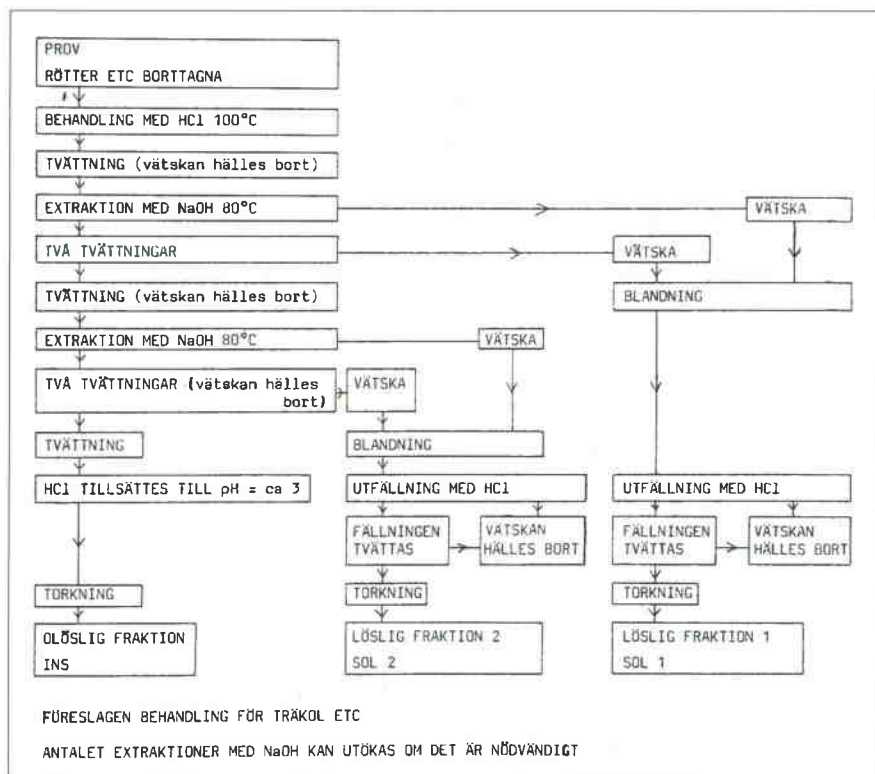
Förbehandling av prov

Eftersom målet är att mäta aktiviteten av ett prov, som verkligen kan datera det man vill datera, är det viktigt att ta bort eventuella föroreningar som kan förrycka resultatet. Föroreningarna kan givetvis vara äldre eller yngre än provet. Ibland kan ålderskillnaden vara liten och ibland stor (Fig. 6). I figuren är ålderskillnaden satt efter x-axeln och felet efter y-axeln.

Först av allt renas provet mekaniskt genom att rötter och annan synlig förorening plockas bort. Om stora träprov eller träkolsbitar erhållits täljer eller skrapar man gärna bort ytskiktet. Provet finfördelas också före den kemiska förbehandlingen.



Figur 6. Inflytande av förorening på ett provs ålder. Föroreningsgraden är given med en procentsiffra. Felet är avsatt efter y-axeln och ålderskillnaden mellan förorening och prov efter x-axeln. Om föroreningen är äldre skall man läsa på de streckade kurvorna. Om föroreningen är yngre skall man läsa på de heldragna kurvorna.



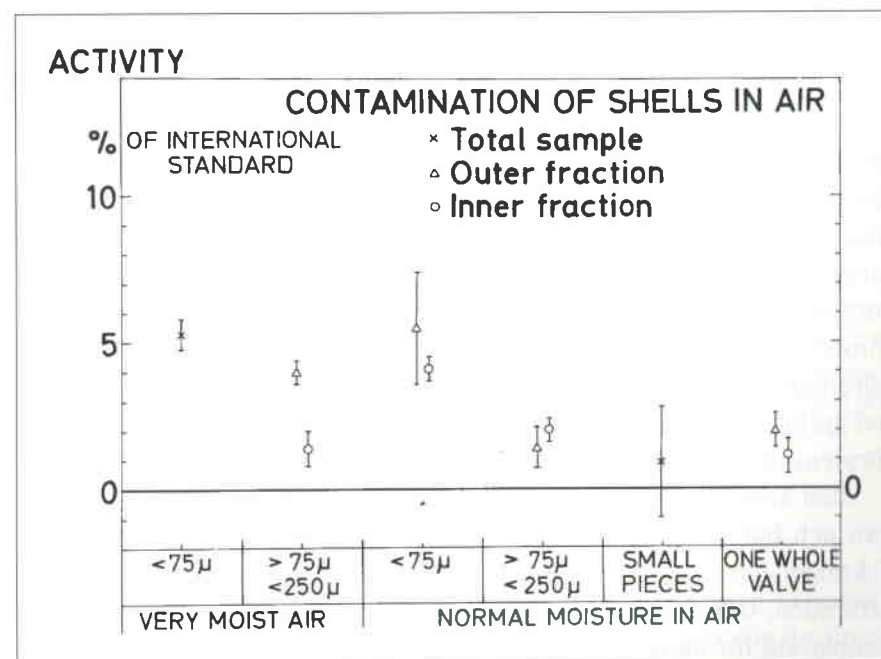
Figur 7. Den förbehandling som de flesta prov bör få. Oftast räcker det med en NaOH-extraktion, men ibland kan fler än två tillgripas. Extraktionerna utsträcks normalt till större delen av dygnet.

En vanlig förorening är karbonat, som man enkelt tar bort genom en syrabehandling om provet är trä, träkol, torv, gyttja eller liknande. Lämpligt är att låta provet sjuda eller koka mycket sakta under ett dygn i utspädd saltsyra (t.ex. 1%), varefter man provar om provet fortfarande är surt, och sedan låter det stå ytterligare något dygn. Provet bör vara finfördelat vid denna behandling och vissa prov, t.ex. sedimentprov, måste röras om upprepade gånger, så att vätskan tränger in ordentligt. Provet tvättas noggrant i avjoniserat vatten till neutralt. Ibland tas saltsyrelösningen och ett par tvättvätskor tillvara för en kontrollbestämning. Denna inledande saltsyrebehandling med tvätt är också viktig, eftersom Ca^{2+} -joner tas bort, vilka annars kan försvåra nästa steg i den normala förbehandlingen (Fig. 7). Detta är en behandling i basisk lösning för att extrahera humussyror, som lätt kan transporteras i naturen med vattenrörelser. Provet behandlas med en utspädd NaOH-lösning (t.ex. 1%) vid $+80^\circ\text{C}$ över en natt. Därefter tvättas det igen med avjoniserat vatten till neutral lösning. I Groningen introducerades för-

behandlingen med bas (de Vries och Barendsen, 1954; de Vries *et al.*, 1958; de Vries och Waterbolk, 1958). Ibland upprepas extraktionen och tvättarna. Natriumhydroxidfraktionerna och de första tvättvätskorna sparas (Fig. 7). Humussyran och vissa andra organiska substanser fälls sedan ut med stark HCl-lösning eller med en lösning med Ca^{2+} -joner. Den i NaOH olösliga delen kallar vi INS (INSOLUBLE) och den i NaOH lösliga delen för SOL (SOLUBLE).

Ofta försvinner en stor del av rottrådarna i ett prov vid förbehandlingen. Produkterna av det normala sönderfallet av rötter och annat material kan till en stor del återfinnas i den lösliga fraktionen (se nedan) som en förorening omöjlig att separera från den "riktiga" lösliga fraktionen.

Normalt dateras fraktionen INS för trä, träkol och torv men den lösliga fraktionen av dy och gyttja. När det gäller torv vill vi gärna datera båda fraktionerna för att få underlag för diskussionerna om tillförlitligheten av resultaten. En stor fördel med den lösliga fraktionen är att man undviker grafit. Hörnsten och Olsson (1964) visade detta

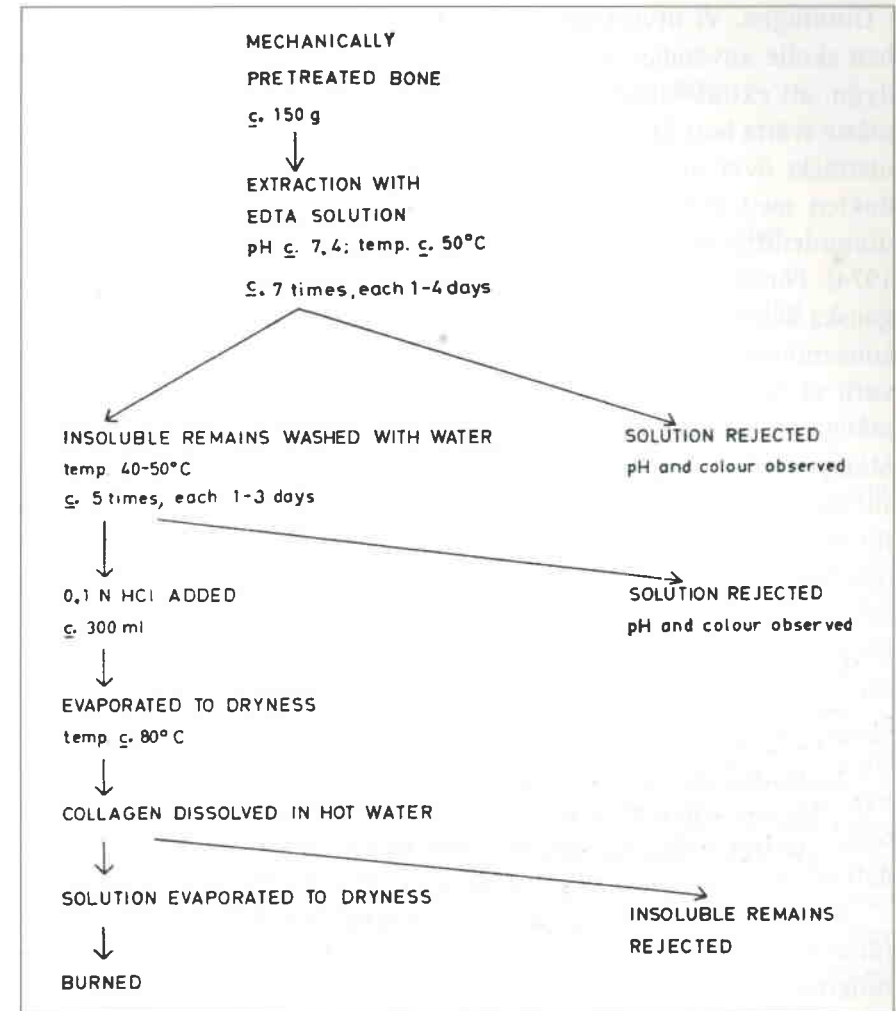


Figur 8. Förorening av skal vid lagring i laboratoriet under olika omständigheter. Proven var av tertiär ålder och hade lagrats i Riksmuséet under ett 30-tal år. Inget prov visade 0-aktivitet. Det framgår att de yttre delarna lättare får en för låg ålder än de inre, att fuktighet påskyndar föroreningen och att en stor yta (små bitar av skalerna) också påskyndar föroreningen.

på glaciärra. Eftersom vatten inte bara kan tränga ner vertikalt genom marken utan även följa naturliga gränsskikt under markytan kan humussyra i detta vatten förorena träkol, även om man i förstona inte väntat sig det. Det kan till synes ligga väl skyddat av svärgenomträngliga lerlager, om man blott beaktar ovanliggande avlagringar så som de framstår i en bild av en sedimentpelare (Olsson, 1983). När det gäller träprov är det naturligtvis i vissa fall rekommendabelt att framställa cellulosa ur provet. När det gäller sjösediment är visserligen den lösliga fraktionen (SOL) normalt bättre än den olösliga (INS) men i vissa fall borde en förfinad förbehandlingsteknik tillämpas. Vi vet dock inte nu hur vi skall gå tillväga. Vissa försök med lipider har gjorts.

Karbonatprovets yttre delar kan lätt ha förorenats och därför skalas de yttersta delarna bort genom en syrabehandling, vilket infördes tidigt i Groningen. Redan på 50-talet började vi i Uppsala dela upp resten i två eller fler fraktioner utifrån och inåt genom ytterligare syrabehandling. Man kan då genom eventuella ålderskillnader få underlag för en bedömning om provet verkar förorenat eller ej. Skal kan lätt förorenas om de ligger fuktigt i marken, t.ex. under grundvattenivån. Skal kan också lätt förorenas av luftens koldioxid vid lång lagring i luft (Fig. 8). Prov som egentligen innehållit så lite ^{14}C att de borde ha daterats till "oändligt gamla", t.ex. äldre än 40.000 år (>40.000 år), kan efter normal lagring i ett museum kanske dateras till 35.000 år. Skalprov bör därför lagras torrt och lufttätt i vakuum eller koldioxid-fri gas efter insamlingen, speciellt om proven är gamla och har stor yta i förhållande till vikten (Olsson *et al.*, 1968). De bör tvättas i urkokt eller surgjort vatten (pH \approx 3). Om en omkristallisation, som lätt leder till en förorening, har skett, kan man i vissa fall spåra den med röntgenanalys. Föroreningen med atmosfärens koldioxid innebär normalt att koldioxid har trängt in i skalet och adsorberats på de inre ytorna och en dylik förorening kan inte upptäckas med röntgenanalys.

Ben är ett speciellt material, som efter en mekanisk förbehandling, kan och bör förbehandlas kemiskt helt annorlunda än trä och träkol. Tekniken har varit föremål för stora diskussioner under mer än tre årtionden. Ganska tidigt visade det sig att de oorganiska delarna inte lämpar sig för datering, eftersom de lätt förorenas av karbonat utfällt ur grundvatten och koldioxid från luften på liknande sätt som skal lätt förorenas. Man har ofta kallat den organiska delen man fått vid en saltsyrebehandling för kollagen, vilket är missvisande. Man får då en blandning av organiskt material av vilket en del kan komma från ben



Figur 9. Den EDTA-behandling som blivit standard i Uppsalas konventionella ^{14}C -laboratorium. För att man skall vara säker på en god förbehandling bör antalet extraktioner, som ges i figuren, tas som ett minimum för såväl EDTA som vatten. Separationen av vätskan från provet sker ofta med hjälp av en vattensug på grund av provets geléform.

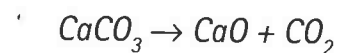
och en del från förorening. Nästa steg var i princip att man extraherade humussyror med NaOH, analogt med vad man gör för de flesta material. Detta visade sig inte vara tillfyllest i många fall. En avslutande extraktion med vatten, som ger en sur lösning, tycks ge ett bra resultat (El-Daoushy *et al.*, 1978). I Uppsala började vi redan år 1964 att pröva förbehandling med en EDTA-lösning på förslag av de Waard

i Groningen. Vi utvecklade metoden och fann att ganska finfördelat ben skulle användas, varje extraktion skulle utsträckas till ungefär 3 dygn, att extraktionerna skulle upprepas omkring 10 gånger, att man måste tvätta bort EDTA-lösningen genom ett 10-tal vattentvättar, varje utsträckt över ungefär 3 dygn, och att en slutlig extraktion av produkten med vatten efter indunstning med saltsyra (Fig. 9) gav ett utmordentligt resultat på samtliga prov som undersöktes (Olsson *et al.*, 1974). Försök att använda apatit har ej varit framgångsrika. En ännu ganska aktuell översikt över använda metoder ges av Taylor (1980). För konventionell datering har Uppsalas version av EDTA-behandlingen varit så framgångsrik att den blivit standard i det laboratoriet. Ehuru många extraktioner går arbetet för varje extraktion lätt och snabbt. Många vattentvättar är nödvändiga för att ta bort all EDTA, som med sitt organiska kol annars kunde förorena provet. Flera av tvättarna göres för att ha mycket god marginal i detta avseende. Separationen av vätska och fast material göres som regel i Uppsala med hjälp av en vattensug och glasfilter. Det bör påpekas att EDTA-extraktionen göres i svagt basisk lösning, så att även humussyror extraheras. För acceleratormätning, som kan utföras med mycket små provmängder, har möjligheten öppnats att extrahera *en* aminosyra och datera den. Hydroxyprolin, som är typisk just för ben, borde vara idealisk. Taylor (1987, s. 53-61) har givit en modern översikt över olika metoder för benförbehandling och rekommenderar användning av upp till 4 fraktioner, eftersom ben-datering är en svår uppgift.

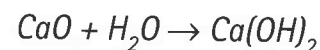
Sotlager kan rent teoretiskt dateras på kolet även om det finnes rötter i provet. En förbehandling, som innebär att man gör cellulosa av rötterna och extraherar bort denna, men lämnar kolet intakt, kan utföras. Här, som i många andra fall, gäller dock att man inte kan skilja på kol, som hör till sotlagret rent genetiskt, och kol, som är sekundärt och transporterats dit genom håligheter av t.ex. maskar eller med vatten. När det gäller vanligt träkol kan det ibland vara lämpligt att pröva bitar av olika storlek. I detta sammanhang kan det också nämnas att större djur kan dra ihop material från olika håll.

Murbruk är ytterligare ett material, som kan dateras, men fordrar en speciell förbehandlingsteknik. För att förklara den bör de kemiska processerna vid tillverkningen fram till torkningen sammanfattas:

- 1) CaO erhålles ur CaCO₃ genom upphettning av karbonat till ung. 1000 grader. Koldioxid avgår

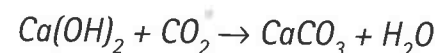


- 2) Vatten blandas med kalciumoxiden. Hydroxid erhålles



Hydroxiden blandas med vatten och sand. Murbruk erhålles

- 3) Murbruket hårdnar: reagerar med koldioxid, karbonat bildas



Om koldioxiden tages från atmosfären bör karbonatet få den aktivitet som atmosfären har vid reaktionen.

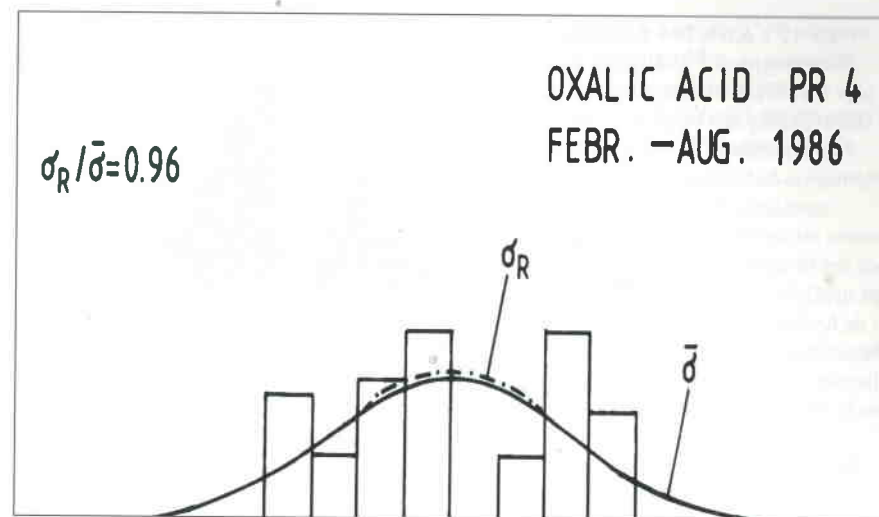
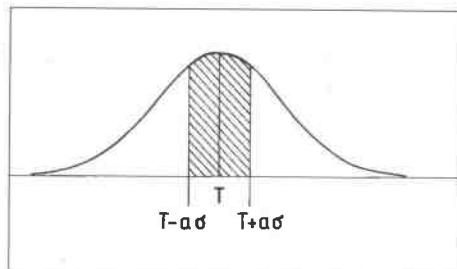
Förbehandlingen innebär att man är mycket försiktig när man krossar murbruket. Själva murbruket skall finfördelas, men det som tillsatts skall förbli så intakt att fraktionerna kan separeras. Själva murbruksfraktionen behandlas med syra så flera fraktioner erhålles. Varje undersökes på sitt $\delta^{13}\text{C}$ -värde och ^{14}C -ålder. Det har dock visat sig ytterst svårt att få tillförlitliga resultat. Ibland har det berott på att gammalt kol tillförts som karbonat med sanden och ibland på att murbruket inte hårdnat inom några veckor utan att det tagit mer än hundra år. Dessutom har man funnit murbruk, som varit så basiskt att modern koldioxid adsorberats (Sonninen *et al.*, 1985). Ehuru man arbetat med murbruksdatering sedan mitten av 60-talet är problemen ännu inte lösta och stor försiktighet måste rekommenderas. Varje provserie ger ett forskningsprojekt.

Statistik

^{14}C -åldrar beräknas i första steget med halveringstiden 5568 eller 5570 år, är relaterade till en internationell standard och följs av ett \pm värde, som är den statistiska osäkerheten σ (sigma) vid bestämningen. Sigma-värdet bör inkludera alla fel eller osäkerheter i den fysikaliska mätningen, d.v.s. också osäkerheten i $\delta^{13}\text{C}$ -normaliseringen, den i tryckmätningen och den i inställningen av spänningen. Det bör också inkludera osäkerheten i bestämningen av standardens aktivitet och i bakgrunden med dess eventuella barometerkorrektur. Tyvärr har inte alla laboratorier följt denna princip, utan många har bara inkluderat den osäkerhet som kommer från själva sönderfallet med följd att osäkerheten underskattats, ehuru själva sönderfallet dock normalt bidrar med den största komponenten.

Det radioaktiva sönderfallet följer statistikens lagar. Det betyder att man från ett prov kan få 100 sönderfall under en viss tid men 90 nästa, 110 en annan och ibland 80 eller 120 o.s.v. Matematiskt säger vi, att den statistiska osäkerheten, σ , är \sqrt{N} för N sönderfall och att det är $2/3$ sannolikhet att man får ett värde mellan $(N - \sqrt{N})$ och $(N + \sqrt{N})$ och 95% sannolikhet att värdet faller mellan $(N - 2\sqrt{N})$ och $(N + 2\sqrt{N})$ (Fig. 10). Det betyder med andra ord att i genomsnitt är 5% av värdena högre än (värdet + 2σ) eller lägre än (värdet - 2σ). Som ett sifferexempel kan 3000 ± 80 år väljas. Om hundra tillförlitliga laboratorier har

Figur 10. En statistisk fördelningskurva som ger en ideal fördelning av resultat kring ett medelvärde, T , vid ett mycket stort antal mätningar. När $\alpha = 1$ illustrerar det skuggade området de resultat, som ges vid en ^{14}C -datering. Det är 68% sannolikhet att resultatet faller inom området $(T-\sigma)$ till $(T+\sigma)$, men 95% sannolikhet att resultatet faller inom intervallet $(T-2\sigma)$ till $(T+2\sigma)$.

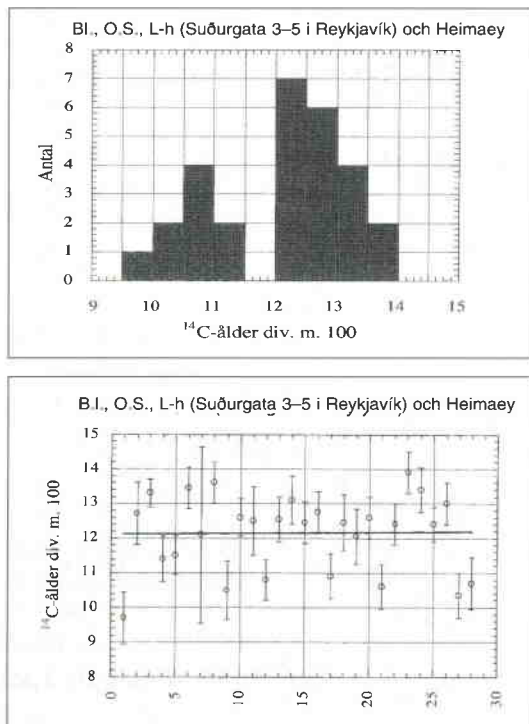


Figur 11. En typisk fördelningskurva (σ_R) erhållen i Uppsala efter upprepade mätningar på ett standardprov, motsvarande stapeldiagram och den förväntade fördelningskurvan.

fått detta medelvärde är det troligt att 2 av dem fått ett värde lägre än 2840 år och 2 ett värde högre än 3160 år. Det är vad man måste vänta sig. I själva verket kan det vara svårt att bedöma om två eller några bestämningar verkligen skall anses datera samma händelse eller om de skall tas som en indikation att det är en åldersskillnad mellan dem. Har man många av varandra oberoende resultat bör man rita upp en statistisk fördelningskurva för de erhållna resultaten med stapeldiagram för de aktuella värdena och en teoretisk fördelningskurva baserad på de väntade osäkerheterna (Fig. 11). Man kan också ge fördelningen (Fig. 12 och 13) och kvoten K mellan det av resultatets spridningen erhållna σ -värdet och det förväntade σ -värdet ($K = \sigma_R / \sigma_{\text{exp}}$). Rent statistiskt bör kvoten bli nära 1,0 - ibland något högre och ibland något lägre. Om K generellt blir högre än 1,0 har de uppskattade felgränserna satts för lågt om det gäller ett prov, som mätts flera perioder. Om K för varje prov, mätt flera perioder, blir nära 1,0 men K för en sats prov blir signifikant högre bör man räkna med att proven representerar ett tidsintervall. I april 1990, när automatisk beräkning med dator infördes i Uppsala för K -värdena för alla kanalers delvärden under dygnet, erhöles under de första 10 dyggen 9 värden mellan 0,80 och 1,15 samt ett värde 1,51. Fem värden var över 1,0 och 5 under.

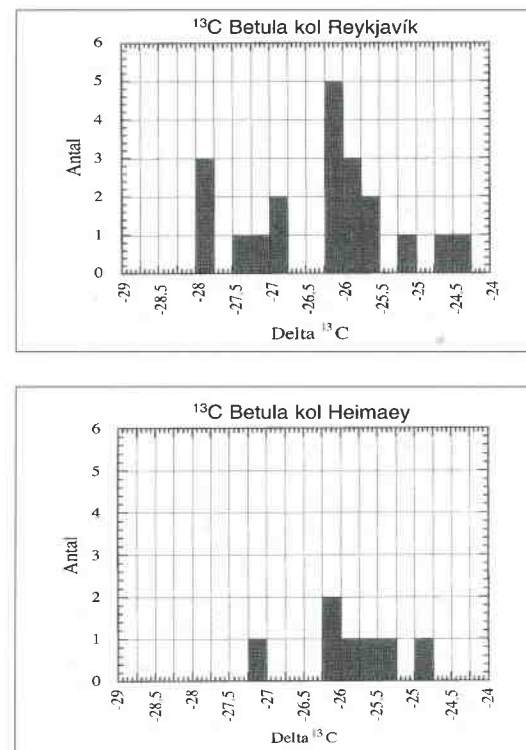
Vid statistisk analys måste man ta hänsyn till om bestämningarna är oberoende eller ej. Om en serie prov mätes under en månad och

Figur 12 a och b. Den statistiska fördelningen av ^{14}C -åldrarna av prov från Reykjavík (Bottom layers, Oldest Smithy och Longhouse) och Herjólfssdalur (Nordahl, 1988; Hermanns-Auðardóttir, 1989) sammanslagna. K-värdet, som ger kvoten mellan det erhållna σ -värdet och det förväntade σ -värdet baserat på uppskattningar av osäkerheterna i de fysikaliska mätningarna, är 1,8. Resultaten ges även som ett vanligt diagram med felgränserna (1σ) ordnade efter U-nummer inom var och en av de fyra grupperna Bottenlagren, Äldsta smedjan och Långhuset från Suðurgata 3-5, Reykjavík, och Herjólfssdalur, Heimaey. Linjen, dragen som funktion av nummer i den ihopslagna serien, visar att ett medelvärde kan beräknas. Resultatet av U-4549, 1235 ± 55 (se tabell 4), är ej inkluderat, eftersom det blev klart 1991 och diagrammen gjordes år 1990.



samma värde på bakgrund och standardprov användes bör således dessa båda storheters felgränser inte medtagas om man skall undersöka skillnader mellan proven. Av samma anledning inkluderas aldrig statistiska osäkerheten för värdet på halveringstiden för ett enskilt prov, ty alla laboratorier skall använda samma halveringstid. Om man sedan kalibrerar resultaten sker det mot värden beräknade med samma halveringstid, och då försvinner värdet på halveringstiden helt och hållet.

$\delta^{13}\text{C}$ -värdena för trä och träkol från Reykjavíksutgrävningen och den i Herjólfssdalur är givna i Figur 5 och 13. De flesta enskilda värdena har osäkerheten $0,4\text{‰}$, men totalt sett blir spridningen snarast omkring $1,0\text{‰}$. Det betyder att man för ett prov därifrån, utan $\delta^{13}\text{C}$ -värde, skulle kunna ansätta medelvärdet $-26,2\text{‰}$ med osäkerheten $\pm 1,0\text{‰}$. Några andra värden på björk från Island finnes i Tabell 2, som visar än större avvikelser från -25‰ än de från Reykjavík. Ett prov från Island bestående av björkved eller träkol från björk, som tidigare daterats utan att någon ^{13}C -analys utförts, bör således antagas haft något för lite ^{13}C och därmed för lite ^{14}C . Resultatet skall korrigeras så att det blir lägre ålder än som tidigare givits.



Figur 13 a och b. $\delta^{13}\text{C}$ -värdena för träkolproven, av björk, från Reykjavík och Herjólfssdalur (Hemön). Resultatet för ett prov U-4549 är ej inkluderat här (se tabell 4).

Tabell 2. $\delta^{13}\text{C}$ -värden för björk från skilda platser på Island

U-nummer	$\delta^{13}\text{C} \text{‰ (PDB)}$	Lokal	Material	Inlämnat av:
4004	-26,5	Skógar	Trä (stam)	Jón Jónsson
4357	-27,6	Skáli	Trä (rot)	Jón Jónsson
6139	-28,3	Hofsstaðir	Trä (stubbe)	Jón Jónsson
6299	-29,5	Laxfoss	Trä (stam)	Sturla Friðriksson
4006	-26,0	Hrifunes	Kol (stam)	Jón Jónsson

Om man skall beräkna den statistiska summan eller skillnaden mellan två prov måste man addera kvadraterna på respektive osäkerhet och sedan dra kvadratroten ur denna summa.

$$\sigma = \pm \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2}$$

Det viktade medelvärde av ett antal resultat T_1, T_2, \dots, T_i med osäkerheterna $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i$ beräknas ur

$$T = \frac{(1/\sigma_1)^2 T_1 + (1/\sigma_2)^2 T_2 + \dots + (1/\sigma_i)^2 T_i}{(1/\sigma_1)^2 + (1/\sigma_2)^2 + \dots + (1/\sigma_i)^2}$$

$$\sigma_T = \left(\frac{1}{(1/\sigma_1)^2 + (1/\sigma_2)^2 + \dots + (1/\sigma_i)^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Reservoarålder och närliggande problem

Koldioxidens kretslopp innebär inte endast att koldioxid upptages, genom växternas assimilation, och avges genom deras respiration och djurens utandning utan även att luftens koldioxid och den i vatten lösta koldioxiden i form av gas, bikarbonat eller karbonat har ett kvantitativt mycket stort utbyte sinsemellan. Det finns en inneboende tröghet i det utbytet, som ger en fördröjning så att snabba ändringar i atmosfärens aktivitet blir dämpade och den lösta koldioxiden, i vilken form den nu befinner sig, i allmänhet får ett fullt mätbart underskott i den relativa ^{14}C -halten gentemot atmosfären. Det kallas reservoareffekten och underskottet omräknat till år kallas reservoaråldern.

Djuphaven bildar en mycket stor reservoar – närmare två tiopotenser större än havens ytvatten. Man kan i första approximationen anse djupvattnet som en enda stor väl blandad reservoar och ytvattnet som en annan väl blandad reservoar. Dessa två reservoarer blandas inte lätt utan även här finnes en tröghet. Det betyder att när ett visst procenttal av det lösta kolet i ytvattnet går över gränsskiktet ner till djupvattnet går närmare två tiopotenser lägre procenttal av djupvattnet upp till ytvattnet, om jämviktsförhållanden råder. Eftersom utbytet går långsamt betyder det också att en stor mängd radioaktivt kol hinner försvinna genom radioaktivt sönderfall i djupvattnet innan utbytet av den lösta koldioxiden sker. Den lägre aktiviteten kan översättas till en reservoarålder. Tillförsel till ytvattnet från djupvattnet leder också till att ytvattnet får en lägre ^{14}C -koncentration än atmosfären, d.v.s. även ytvattnet får en reservoarålder. Denna har man försökt bestämma genom att mäta aktiviteten i prov från muséer. Det är mycket svårt att tillförlit-

liga resultat på prov från 50-talet, och senare, på grund av den ökade aktiviteten i atmosfären som en följd av atombombstester. Man har också försökt undvika andra prov, yngre än hundra år, på grund av industrieffekten. Men även prov som är äldre, men fortfarande yngre än ungefär 450 år, vållar problem på grund av att den atmosfäriska ^{14}C -aktiviteten varierade mycket det senaste halva årtusendet. Man har gjort en uppskattning av väntad aktivitet och jämfört med den mätta och på så sätt fått fram en skillnad - reservoareffekten. Till en början tog man endast hänsyn till åldern, nästa steg blev att man även tog hänsyn till industrieffekten och därefter inkluderade man de tidigare variationerna i atmosfärens ^{14}C -aktivitet. Många gamla resultat måste därför omtolkas. I området kring Danmark och södra Sverige bör man räkna med omkring 330 år, utanför södra Norges kust omkring 370 år, och norra Norges omkring 445 år (Olsson, 1980) och i Íslands kustvatten 365 ± 20 år (Håkansson, 1983). Det gamla värdet för Ísland, som Olsson gav, skall inte längre användas, eftersom Håkansson har baserat sitt värde på 6 nya egna bestämningar. Det gamla värdet var uträknat som ett medelvärde av några tidigt utförda bestämningar, som till en del inte åtföljts av $\delta^{13}\text{C}$ -värden. De tidigare utförda analyserna visade också en stor spridning liksom tillgängliga resultat från Svalbard och Grönland gör. Det enda värdet från Färöarna är inom felgränserna desamma som Håkanssons från Ísland. Västra Grönland har en lägre reservoarålder än östra (Olsson, 1980), något lägre respektive högre än det värde för Svalbard, omkring 425 år, som Olsson (1980) räknade ut. Den stora spridningen för vissa områden kan bero på naturliga variationer uppkomna genom havsströmmarnas inverkan på blandningen. Det bör påminnas om att värdena ovan är givna efter en normalisering till -25‰ i PDB-skalan för $\delta^{13}\text{C}$. Vissa laboratorier har inte följt den internationella rekommendationen om detta utan föredragit att normalisera marina skal till det typiska värdet 0‰ . Detta har tyvärr förorsakat en del missförstånd så felaktiga tolkningar av erhållna resultat publicerats.

Betydelsen av källan kan illustreras med den reservoareffekt som kan bestämmas för isbjörnar, vissa fåglar och människor, som till en stor del lever av fisk.

Varje sjö bör också ha en viss reservoarålder och man bör räkna med att även kärr kan ha det eftersom det där finnes submers växtlighet. Respirationen från rötterna och andra processer som sker i översta sedimentlagret frigör koldioxid som rimligtvis har en viss ålder. Det man först fruktade mest var sjöar med hårt vatten, som alltså innehåller

upplöst kalk från avlagringar som är mycket äldre än vad man kan datera med ^{14}C -metoden. Reservoaråldern kan också bero på tillförsel av källvatten, som inte haft kontakt med atmosfären under viss tid, och på långsamt utbyte med atmosfären. Utbytet bör i sin tur bero på djup, vindar, temperatur och pH. Dessutom kan plantor pumpa ner koldioxid genom sin assimilation ur atmosfären, t.ex. växter som *Equisetum*, vass och näckrosor. Enligt den erfarenhet som vunnits i Uppsala är det realistiskt att räkna med en reservoarålder på några hundra år i allmänhet, men mycket högre i vissa fall och då speciellt för kalkhaltiga sjöar. Reservoaråldern kan ha ändrats under årtusendenas lopp. En orsak kan vara urlakning av kalk i omgivningarna. De submersa växterna bör reflektera vattnets reservoarålder. Ett undantag är de växter som tar sin koldioxid från sediment såsom *Lobelia dortmanna*. Submersa och flytande växter insamlade i bäckar från heta källor har också visat sig ha ett mycket stort ^{14}C -underskott. I Uppsala har två prov mätts, insamlade år 1990 i Reykjadalur. Den skenbara åldern blev ungefär 14.500 respektive 7.500 år. Ett prov togs från Flúðir år 1989. Dess skenbara ålder mättes, också i Uppsala, till ungefär 1.000 år.

Humussyror kan tränga ner i marken och förorena träkol och andra prov varför man tvättar bort dem. På motsvarande sätt kan humussyror från torv läcka ut i vattendrag och sjöar och därmed ge ett tillskott med lägre aktivitet än den i samtida atmosfär. Å andra sidan kan sedimentet, dy eller gyttja, i en sjö till en del härröra från terrestriska växtdelar, såsom löv, och från vattenväxter som tar sin koldioxid från luften, t.ex. *Equisetum* och vass, och till en del från växter som tar sin koldioxid såväl från vattnet som från luften. Reservoaråldern för sedimentet bör således variera med läget i sjön.

En klar föroreningsrisk för sediment i sjöar föreligger på grund av att det ofta till en stor del är minerogent, d.v.s. innehåller oorganiskt material som tillförts sjön från omgivningarna. Då följer ofta äldre organiskt material med. Det kan vara något äldre eller mycket äldre om det är grafit. Exemplet som gavs på glaciära var från lervarv där grafiten rimligtvis hade transporterats långa vägar. Erosion är en vanlig orsak för tillförsel av material, som är äldre än det egentliga sedimentet.

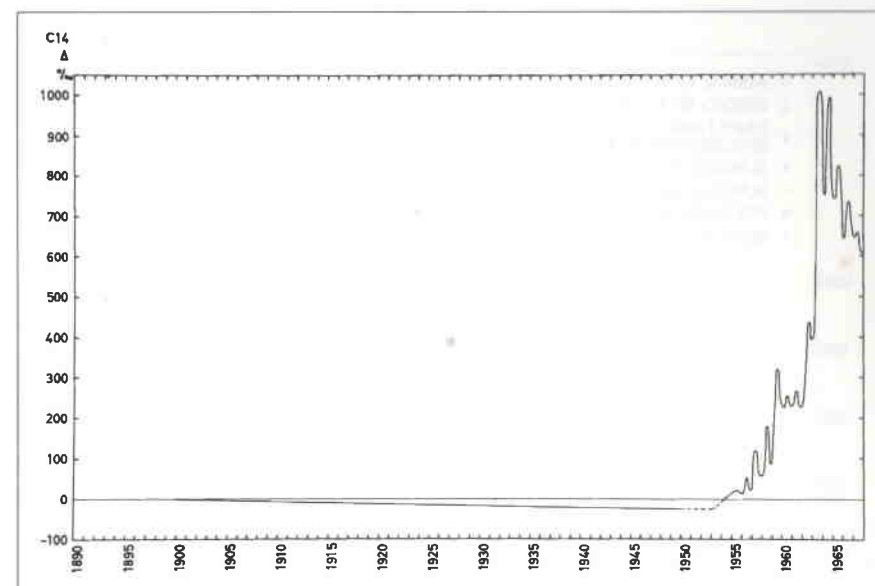
Globala ^{14}C -variationer förorsakade av människan

Industrieffekten

På 50-talet blev man medveten om att det verkligen förekommit stora globala variationer i den relativa koncentrationen av ^{14}C . Det började med industrieffekten, även kallad Suess-effekten efter Suess, som först skrev om den. Genom förbränning av fossilt bränsle har stora mängder inaktivt kol tillförts atmosfären, så att en nedgång i dennas aktivitet på ett par tre procent kunde uppmätas. Detta är ett lägre procenttal än det för tillförseln genom förbränning, men en stor del av denna koldioxid har försvunnit ut i haven. Den nedåtgående trenden i atmosfärens ^{14}C -innehåll (Fig. 14) bröts på grund av atombombsproven. Helt naturligt är industrieffekten en global effekt eftersom koldioxiden sprids ganska fort, men den varierar från region till region.

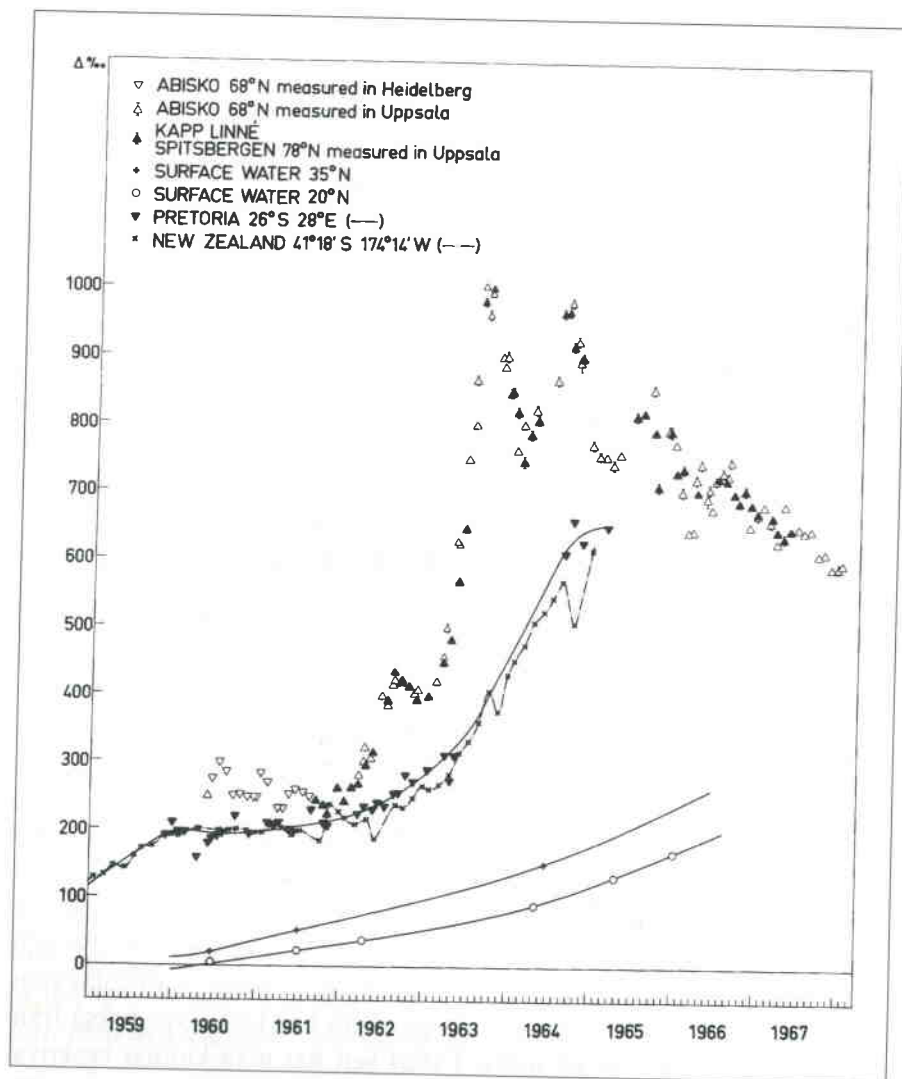
Atombombseffekten

De sovjetiska proven på Nova Zemlja producerade många neutroner i stratosfären och därför ökade den atmosfäriska ^{14}C -aktiviteten sommaren 1963 till dubbla det normala värdet och samma höga nivå nåddes sommaren 1964. Det gäller våra områden – i varje fall där en stor industrieffekt inte var för handen. I USA tycks överskottet ha varit något mindre – åtminstone 1963. F.ö. visade överskottet ett starkt säsong- och latitudberoende under många år (Fig. 15). Detta förklaras



Figur 14. Industrieffekten (även kallad Suess-effekten) och atombombseffekten.

med att partiklar och gaser i stratosfären har svårigheter att passera tropopausen – gränsskiktet mellan stratosfär och troposfär. Tropopausen över polerna rör sig emellertid i vertikal led och partiklarna kan då pumpas ned på våra breddgrader i skarven mellan den stillaliggande tropopausen över ekvatorn och den rörliga över polerna. Partiklar och gaser har f.ö. även svårt att röra sig över ekvatorn såväl i stratosfär som i troposfär. Överskottet i atmosfären på södra halvklotet var också från början mycket lägre än på norra. I stort sett har man kunnat beskriva nedgången med en exponentialfunktion från mitten av 60-talet tills helt nyligen. Överskottet var år 1990 ungefär 15% på såväl norra som södra halvklotet. Redan för drygt 10 år sedan var skillnaderna mellan olika områden på jorden mycket små. Aktiviteten i havens ytvatten nådde ett flackt och betydligt lägre maximum med några års fördröjning gentemot atmosfären (Nydal *et al.*, 1980). Differensen mellan atmosfär och hav är nu åter endast några procent. Nu kan man ånyo studera regionala skillnader i atmosfären. På 60-talet visade Lerman *et al.* (1970) att det av allt att döma varit lägre aktivitet på södra halvklotet än på norra. Det var snarast fråga om knappt 1/10% så rent statistiskt var skillnaden inte helt säkerställd, allra helst som endast få prov



Figur 15. Atombombseffekten och dess säsongberoende omkring år 1965, den lägre effekten på södra halvklotet och den lägre aktiviteten i havsvattnet i ett par olika områden på norra halvklotet (Olsson, 1968).

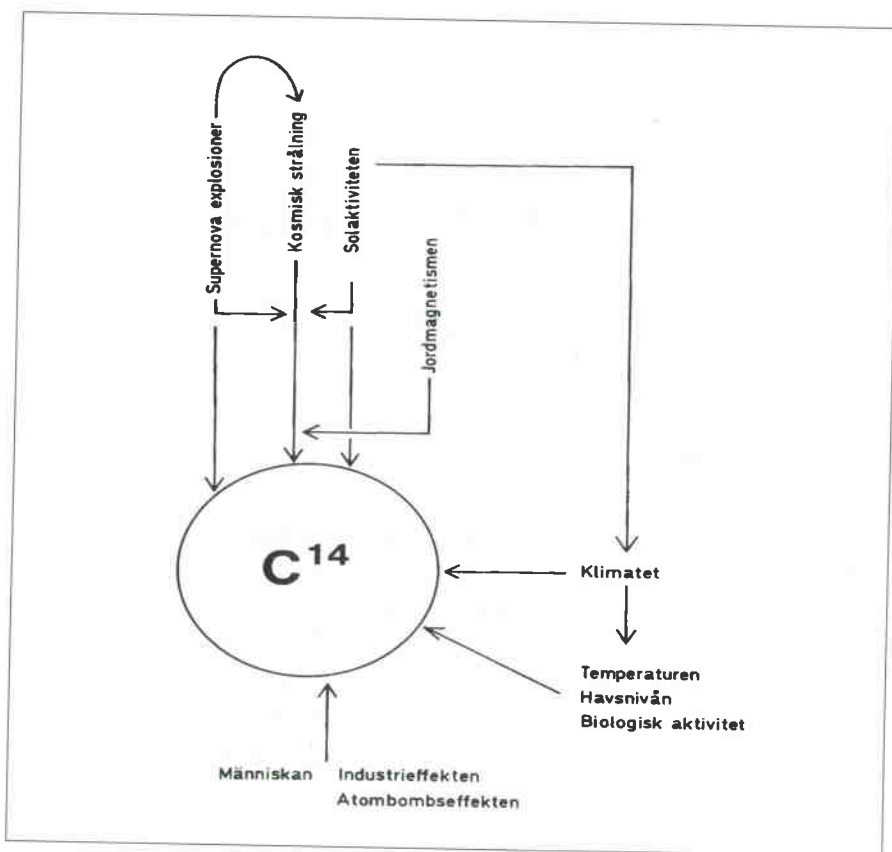
då fanns med i jämförelsen. Lerman *et al.* (1970) förklarade skillnaden med den relativt sett större havsytan på södra halvklotet. Liknande tankegångar framfördes även av Kigoshi och Hasegawa (1966). Detta är bakgrunden till den ö-effekt, som har studerats av författaren och behandlas närmare nedan.

Globala naturliga ^{14}C -variationer

I mitten av 50-talet förelåg ett antal ^{14}C -mätningar som tydde på att den naturliga ^{14}C -aktiviteten i atmosfären hade varierat. De första otvetydiga resultaten publicerades av Münnich (1957), men det var de Vries i Groningen (1958) som försökte förklara resultaten som en konsekvens av klimatförändringar, vilka han beskrev med glaciärers tillväxt och tillbakadragande. Han gjorde en modell med kondensatorer, föreställande reservoarer, och motstånd (resistanser), symboliserande motståndet vid övergång från en reservoar till en annan. På grund av de Vries' banbrytande arbete har de tidigare naturliga variationerna benämnts de Vries-effekten. de Vries själv hann föreslå att en eventuell korrelation med solaktiviteten skulle studeras.

När den kosmiska strålningen når stratosfären kan ^{14}C bildas, men ett hinder är det jordmagnetiska fältet som kan avlänka den kosmiska strålningen (Fig. 16). På analogt sätt kan de laddade partiklar som utsändes från solen avlänka den kosmiska strålningen. En ökning av det jordmagnetiska fältets intensitet och/eller solaktiviteten kan således leda till en minskning av ^{14}C -produktionen. För solaktiviteten kompliceras situationen genom att ^{14}C också produceras. Klimatet bör också kunna påverka ^{14}C -innehållet i atmosfären. Den största reservoaren är haven och därmed bör havsytanivån – storleken av denna reservoar – tas med i diskussionen. Temperaturen bör också ha stor betydelse eftersom lösligheten av koldioxid minskar när temperaturen ökar. Allt detta diskuterades vid Nobel Symposium 12, som hölls i Uppsala år 1969 (Olsson, 1970).

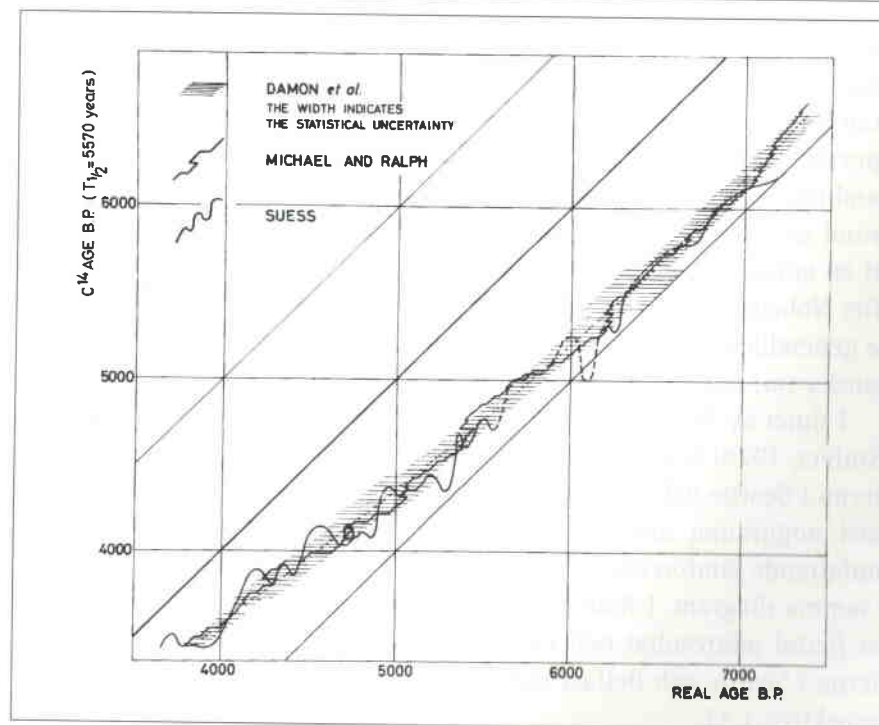
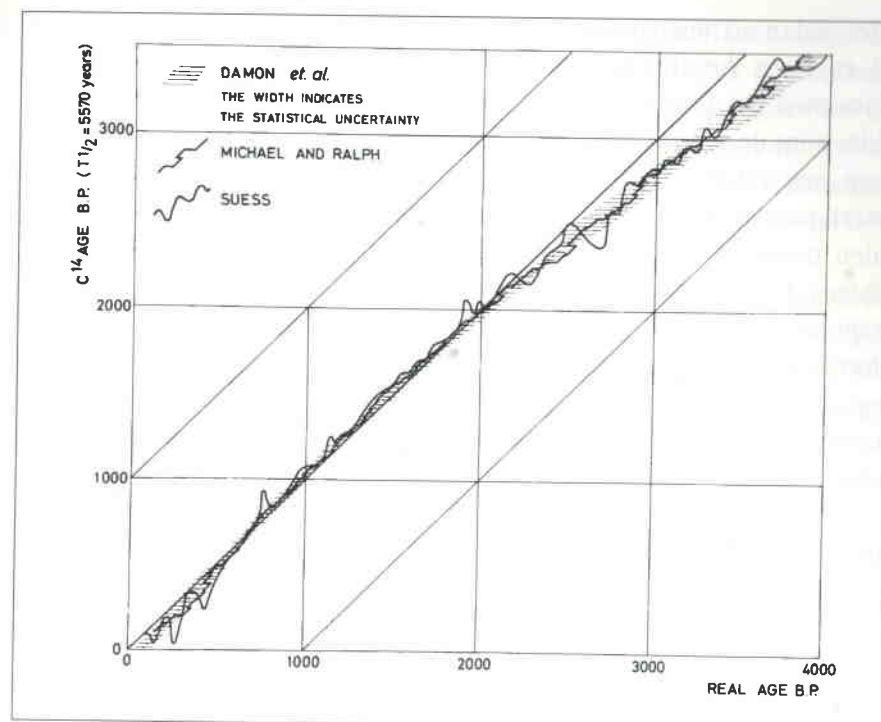
Eftersom begynnelseaktiviteten varierat är det av största intresse att samla data om variationerna. För detta behöver man till åldern väl



Figur 16. Produktion av radioaktivt kol och faktorer, som påverkar koncentrationen.

bestämda prov. Man hade tidigt historiskt väl kända prov från Egypten och man kunde få prov bestämda med dendrokronologi - årsringsbestämda prov från träd. Till en början användes de egyptiska proven mycket urskillningslöst eftersom prov vars ursprung inte var väl bestämt även användes. Ett strikt urval presenterades vid Nobel Symposium 12 av Säve-Söderbergh och Olsson (1970). Dendrokronologien fick stimulans från ^{14}C -laboratorierna, när behovet av åldersbestämt material blev uppenbart. De första träproven var ofta *Sequoia* och enstaka ekprov. Så småningom blev *Pinus aristata* tillgängligt och därmed nådde man längre tillbaka i tiden. Dessa träd kan bli mycket gamla.

Dendrokronologien bygger på mätning av årsringarnas bredd. En torr sommar men även en kall sommar blir tillväxten dålig och en smal ring bildas, åtminstone om växtplatsen inte ändå är tillräckligt fuktig



Figur 17 a och b. ^{14}C -variationerna så som de uppfattades och tolkades av olika forskargrupper år 1972 (Olsson, 1974). Bilden ger en god bild av de stora dragen av variationerna.

eller sådan att temperaturen inte är kritisk som vid undre trädgränsen på ett berg. Årsringmönstret blir karakteristiskt. Detta mönster jämföres med det från en något äldre stock vars yngsta delar har samma ålder som de äldsta ringarna av den första stammen. Mönstren passas ihop och tidsskalan täcker nu de båda stammarnas tillväxttid. Med ytterligare stammar kan så tidsskalan utsträckas steg för steg från nutiden tusentals år bort i tiden. Mönstret är typiskt för trädslaget och platsen. Ett barrträd t.ex. assimilerar med barr från mer än ett år, träden reagerar olika på fuktigheten och när nederbörden kommit, och tillväxtperioderna är inte alltid desamma. Från en lokal kan denna kronologi utsträckas till ett större område eller en region och ett mönster, en standardkurva, erhålls som kan användas på okända prov. Ibland måste man göra en ^{14}C -datering för att kunna bestämma vilken del av en mönsterkurva som skall väljas. Mönstret kan vara likartat för olika tidsperioder. Givetvis måste överlappningen ofta omfatta tiotals år för att säkerhet i dateringen skall föreligga. Ibland kan en ring fattas och ibland kan dubbla ringar erhållas. Olika trädslag lämpar sig olika väl för dendrokronologiska dateringar. Ek är bra och ger ganska breda ringar och risken för dubbla ringar är liten.

Under senare hälften av 60-talet kom flera kurvor över ^{14}C -variationer. En del var mindre tillförlitliga på grund av felande ^{13}C -värden eller att ^{13}C inte mätts på den gas som använts vid aktivitetsmätningen utan på koldioxid som erhållits efter förbränning av räknegasen, som uppenbarligen inte skett med 100% utbyte. I några fall tycks förbehandlingen ej varit tillfredställande utförd och i andra förelåg fel på grund av otillfredställande pumpning av detektorn mellan proven, så att en minneseffekt så småningom kunde spåras. Sammanställningarna efter Nobelsymposiet och ^{14}C -konferensen i Nya Zeeland visade klart på de generella dragen men spridningen mellan laboratoriernas värden var ganska stor och värdena tolkades olika (Fig. 17).

I slutet av 70-talet publicerades de första högprecisionsmätningarna (Stuiver, 1978) och därefter har fler publicerats. Det är främst laboratorierna i Seattle och Belfast, som har presenterat tillförlitliga mätningar med noggranna analyser av felgränserna. De har också genomfört omfattande jämförelser sinsemellan och deras värden kan nu användas i samma diagram. I *Radiocarbon* från år 1986 (vol. 28, No. 2B) finnes ett flertal mätresultat och kurvor som kan rekommenderas. Laboratorierna i Seattle och Belfast har där uppgivit att deras K-värden är 1,53 respektive 1,23.

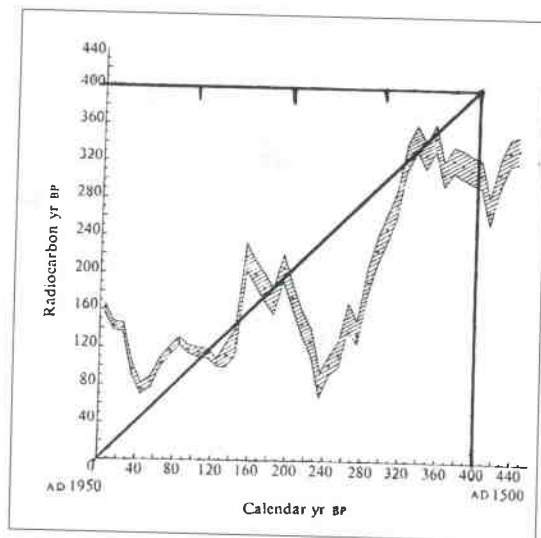
Som en följd av de naturliga variationerna fattades ett beslut på

^{14}C -konferensen år 1959 i Groningen att en internationell standard skulle användas. Mätningar av aktiviteten hade föregått konferensen och ett värde valdes, som skulle motsvara aktiviteten närmast före det att industrieffekten blev märkbar. Det är 95% av aktiviteten år 1950 av en oxalsyra, som distribuerades från National Bureau of Standards i Washington. Värdet gäller om $\delta^{13}\text{C}$ är -19‰ . I annat fall måste en normalisering ske till -19‰ i PDB.

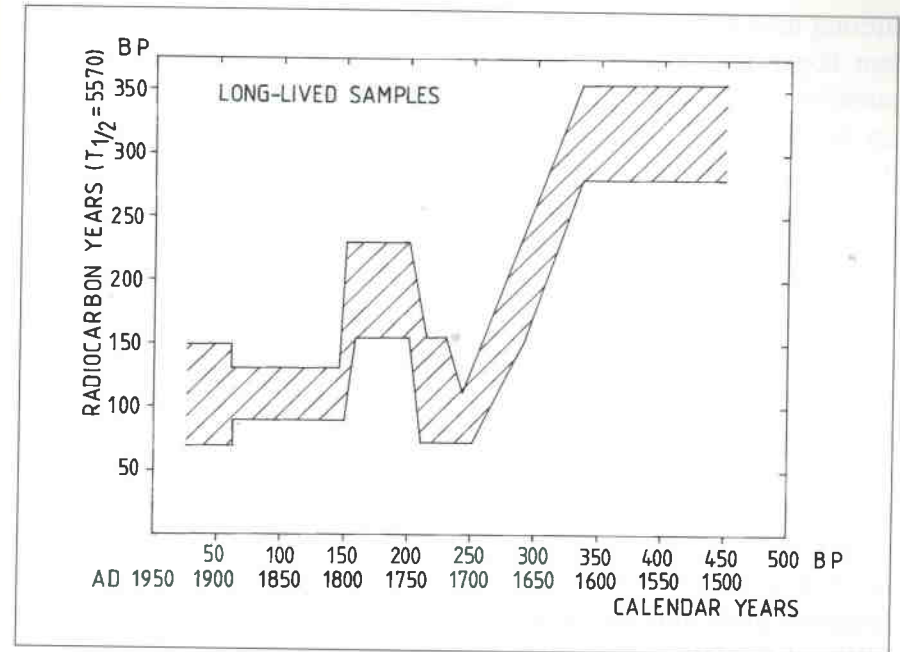
Bestämningar utförda och utlämnade före hösten 1959 och under en övergångsperiod måste sålunda som regel korrigeras. År 1967 gav *Radiocarbon* ut ett specialnummer, ett *INDEX*, med tabeller över omräknade värden. Korrigeringarna kan vara positiva eller negativa och överstiga 100 år, så de är inte betydelselösa i diskussionerna.

Kalibrering

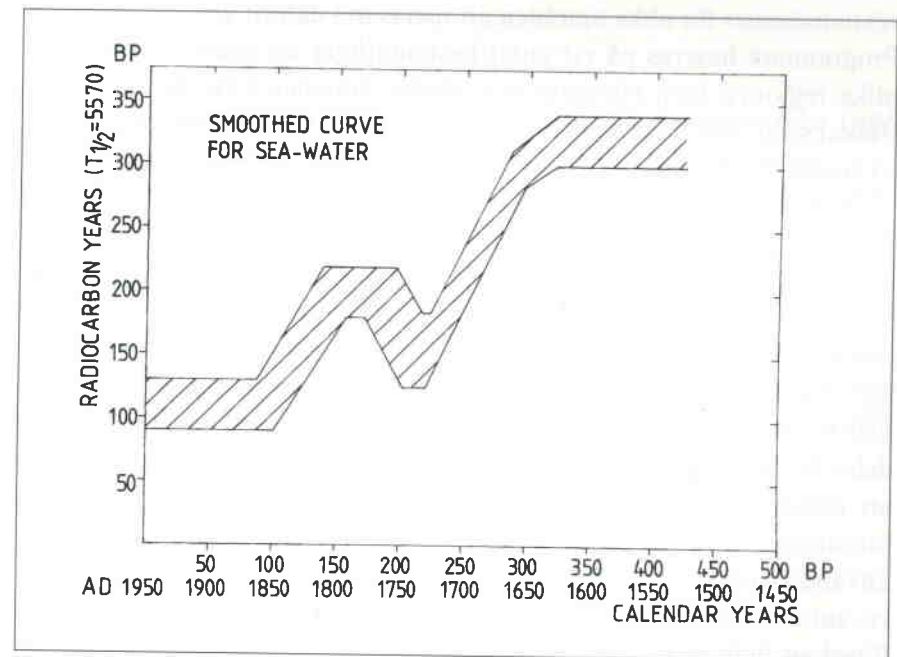
På grund av att avvikelserna från idealförhållandet ^{14}C -ålder = *verklig ålder* är större än osäkerheterna i mätningarna för nästan hela åldersintervallet vi arbetar med måste resultaten kalibreras, om jämförelse skall kunna göras med åldersbestämningar gjorda med annan metod. I *Radiocarbon* från 1986 (vol. 28, No. 2B) finnes alla resultat samlade, vilka då var aktuella. De båda första uppsatserna (Stuiver och Pearson, 1986; Pearson och Stuiver, 1986) omfattar tiden tillbaka till 2500 f. Kr. De värdena anbefalls av ^{14}C -samhället för användning enligt beslut vid 12:e internationella ^{14}C -konferensen i Trondheim år 1985. Övriga diagram ger en god bild av vad som gäller, men har inte ansetts vara av fullt samma klass och betraktas som icke slutgiltiga. Resultaten finnes som diagram och tabeller. Mycket av materialet i volymen finnes också på en diskett tillsammans med ett datorprogram, som tillåter en kali-



Figur 18. ^{14}C -variationerna de senaste århundradena (Stuiver, 1978) med en linje inlagd visande idealförhållandet utan de stora variationerna.



Figur 19. Stuivers kurva från 1978 omtolkad av Olsson för långlivat material som torv.



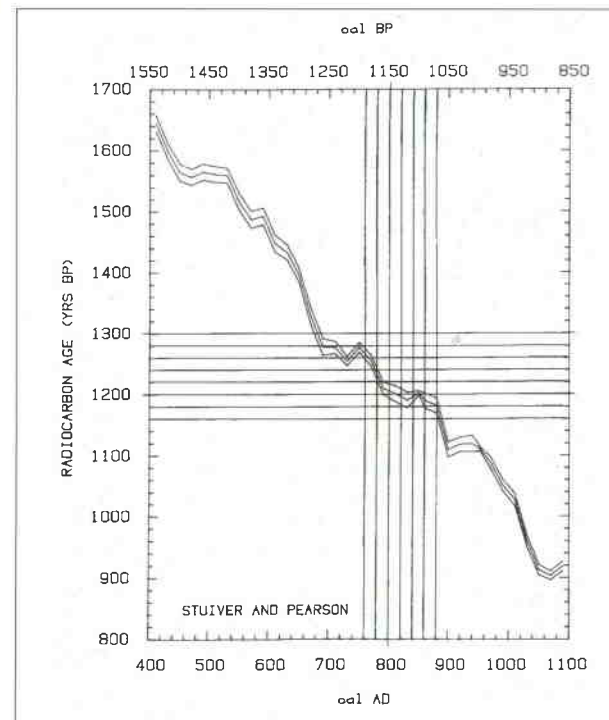
Figur 20. Stuivers kurva från 1978 omtolkad av Olsson (1980) för havsvatten för diskussion av reservoarålder.

brering med hjälp av en dator (Stuiver och Reimer, 1986). Programmet kan köpas för en symbolisk summa. Resultaten ges som skärningspunkter med kalibreringskurvan och åldersintervall motsvarande 1 och 2σ . En grafisk bild erhålles också. Andra program, som bygger på samma databas, har utarbetats vid olika laboratorier. Vissa ger en statistisk fördelningskurva. Det från Groningen användes i avhandlingen om Herjólfsdalur (Hermanns-Auðardóttir, 1989).

Eftersom ^{14}C -koncentrationen visar tydliga korttidsvariationer motsvaras inte alltid en ^{14}C -ålder av en kalenderålder utan av tre eller flera åldrar (Fig. 18). Ibland motsvaras ett intervall, t.ex. begränsat av $\pm\sigma$, av ett kortare intervall kalenderår, ibland ett längre. På motsvarande sätt är de uppgivna felgränserna för en mätning av betydelse för om det efter kalibreringen blir ett antal smala intervall eller ett bredare. Dessutom blir resultatet olika för kort- och långlivade prov. För kortlivade prov som sädeskorn eller fina kvistar omfattande en egen ålder om mindre än 10 år använder man en kurva med mer detaljerat mönster än för ett långlivat prov som torv (Fig. 19). Ett reviderat program från Seattle tillåter detta. Ett större problem uppstår när prov med en reservoarålder skall kalibreras. Då måste en än mer utjämnad kurva användas liknande den som Olsson (1980) gav för marina prov (Fig. 20). Detta har genomarbetats av Stuiver *et al.* (1986). Till databasen hör en karta med korrektionstermer för olika områden att matas in i datorn vid kalibreringen. Programmet baseras på ett antal bestämningar av reservoaråldern för olika regioner, men eftersom nya värden kommer, t.ex. det för Island (Håkansson, 1983) för vilket område endast tre värden från laboratoriet i Lamont medtagits, bör denna del av programmet revideras.

Långlivade prov komplicerar tolkningen av resultat eftersom den mätta aktiviteten är en medelaktivitet. Vissa lavararter kan ha en egen ålder av tiotals eller kanske hundratals år (Olsson *et al.*, 1984).

När det gäller kalibrering av resultat för *Landnám* i Island möter svårigheter emedan kalibreringskurvan visar ett flackt område (Fig. 21). Ett relativt snävt intervall för ^{14}C -åldrar motsvaras av ett längre intervall för kalenderår. Ett annat problem, som torde vara av största betydelse för den isländska kronologien är att ^{14}C -halten över Island av allt att döma är lägre än över de områden från vilka material för kalibreringen hämtats. Detta behandlas nedan och innebär att vi måste använda andra kalibreringskurvor eller, vilket sker nedan, subtrahera ett antal år från varje dateringsresultat före kalibreringen. En liten tillförsel av inaktiv koldioxid från vulkanisk aktivitet är fullt möjlig, och trolig i vissa speciella fall, men utbytet med de stora vattenmassornas



Figur 21. Kalibreringskurva för prov med ålder omkring 1200 ^{14}C -år (Stuiver och Pearson, 1986) med några linjer inlagda för diskussionen av *Landnám* i Island.

upplösta koldioxid synes mer trolig. *Kurvorna i Radiocarbon från 1986 kan inte användas för isländska prov utan speciella korrektioner.*

Rent allmänt kompliceras kalibreringen också av att några av laboratorerna mäter en något för hög aktivitet på sin standard och några en något för låg som en konsekvens av statistikens lagar. Detta leder till för höga respektive för låga åldrar. Vanligtvis användes ett engelskt ord *bias* för att uttrycka den systematiska skillnaden mellan laboratorerna. Ett laboratorium kan naturligtvis ha en positiv bias en viss tidsperiod och en negativ en annan eller en bias för en detektor och en annan för en annan detektor.

^{14}C i vulkaniska områden

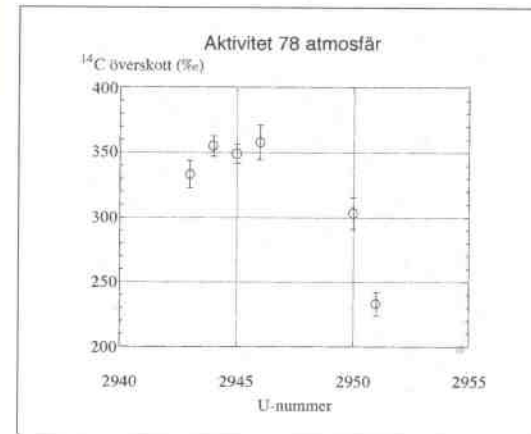
Komplikationer vid ^{14}C -datering av prov från vulkaniska områden såsom Island kan rimligtvis uppstå, eftersom stora mängder inaktiv koldioxid frigöres. Libby och Libby (1973) gjorde beräkningar av detta och fann att denna mängd var för liten för att på ett märkbart sätt påverka atmosfärens innehåll av radioaktivt kol, sett ur globalt perspektiv, men utslöt inte att lokala effekter skulle kunna spåras.

Sulerzhitzky (1970) gav en rad olika exempel. Han visade att vissa samtida prov inte innehöll mer än några få procent av modernt kol. Ett mycket slående exempel skall beskrivas här. Ett träd med 40 årsringar hade uppenbarligen dödats vid en vulkanisk eruption. De yttersta åtta årsringarna erhöll vid datering en ^{14}C -ålder som var 1700 år högre än de innersta 16 och de nästa 8 ringarna innifrån räknat. De 8 ringar, som var omedelbart innanför de yttersta åtta, erhöll en skenbar ålder som var 800 år högre än de innersta ringarna. Sulerzhitzky gav också exempel på modernt trä som hade för lågt innehåll av radioaktivt kol trots att närmaste källa för vulkanisk koldioxid låg 30-40 km bort. Stor skillnad erhöles också i en dalgång där ett prov taget på 10 m höjd innehöll 37% av vulkanisk koldioxid under det att ett prov taget på 500 m höjd knappast innehöll någon. På ytterligare ett ställe var andelen vulkanisk koldioxid 11% trots att insamlingsstället låg 4 km från närmaste källa för vulkanisk koldioxid.

Chatters *et al.* (1969) gjorde undersökningar på Hawaiiöarna i olika riktningar från fumaroler. Effekten varierade men kunde iakttagas på avstånd upp till ungefär 1,5 km och i vissa fall var den stor.

Saupé *et al.* (1980) fann koldioxid som verkade äldre än 41.000 år och växter med en skenbar ålder mellan 365 och 4350 år i ett område som inte haft något utbrott i historisk tid, men som nu har heta källor.

Šilar (1976) mätte på gräs i närheten av CO_2 -källor och något prov

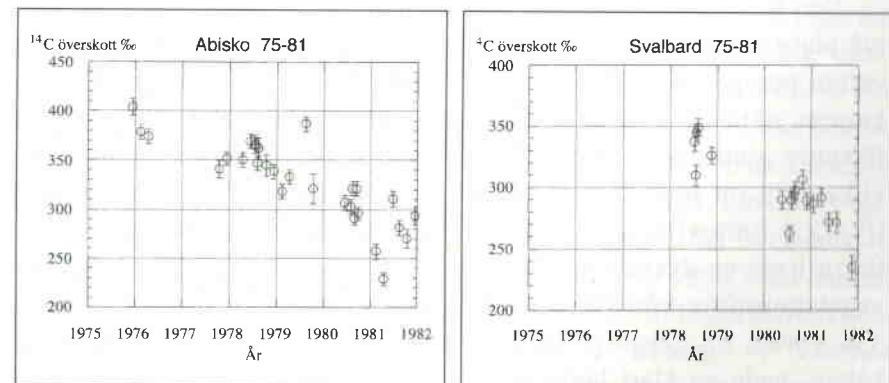


Figur 22. Överskottet av ^{14}C -aktiviteten för fyra „normala” atmosfärsprov från Island insamlade 23 till 27 juli 1978 (U-2943-2946) med erhållit medelvärde $348,9 \pm 4,6\text{‰}$ och K-värdet 1,20 (egentligen väl få resultat att räkna K-värde på) samt på ett prov från nya lavan (vid vattenrören) med överskott $303,2\text{‰}$ och ett på solfataraområdet nära Urðaviti med överskottet $233,2\text{‰}$.

erhöll en skenbar ålder om 17.000 år och den utströmmande koldioxiden åldern 32.000 år.

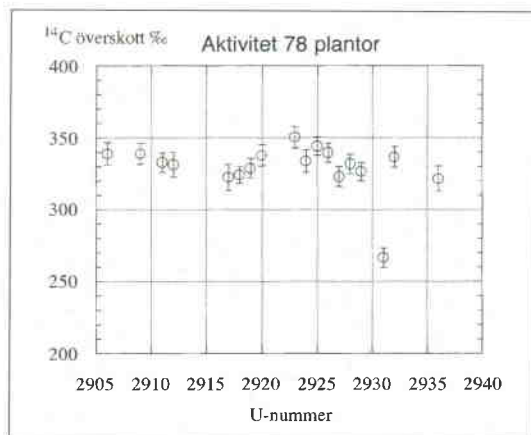
Bruns *et al.* (1980) mätte bl.a. på prov från Palea Kameni/Thera där den senaste perioden för vulkanisk aktivitet var år 1950. Där finnes submarina källor för vulkanisk koldioxid och i omedelbar närhet (5 och 10 m) motsvarade aktiviteten drygt ett tusen år.

I samband med en nordisk geologisk exkursion på Island år 1971 började författaren tänka på ett eventuellt inflytande av vulkanisk koldioxid på ^{14}C -resultat från Island sedan Sigurður Þórarinnsson talat om de till synes för höga åldrarna på isländska prov. Författaren fick hjälp vintern 1973 med insamling av två prov från Heimaey. Det ena hade en aktivitet på omkring 3% av modern aktivitet (20 till 23 februari, 1973, i källaren vid Hraðfrystistöð). Det andra hade ett överskott på 410



Figur 23 a och b. Överskottet av ^{14}C -aktiviteten för atmosfärsprov från Abisko och Svalbard för åren omkring 1978.

Figur 24. Överskottet av ^{14}C -aktiviteten för vegetationsprov insamlade juli 1978 på Island. Resultaten är grupperade så att den första gruppen omfattar prov, som kan betecknas som tämligen normala för Island med erhållen överskottsaktivitet $333,0 \pm 2,2\text{‰}$ och K-värdet 1,35, den andra prov insamlade ganska nära källan Deildartunguhver med överskottet $333,2 \pm 3,0\text{‰}$ och K-värdet 1,35, och den tredje ett enda prov taget mycket nära källan. De båda proven från Námafjall och Námaskarö har gett de lägsta aktiviteterna i den „normala” gruppen.

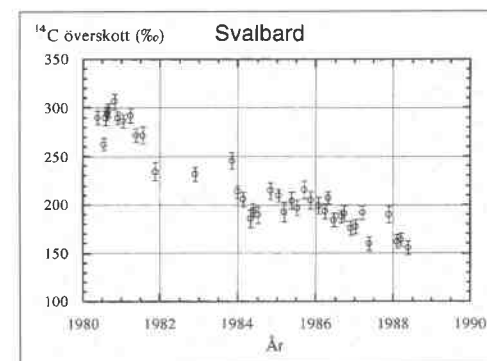
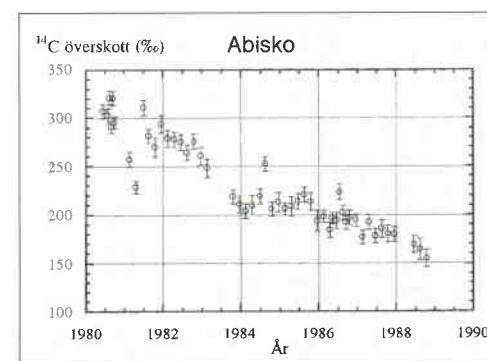


$\pm 8\text{‰}$ (2 till 4 februari, 1973, Kirkjuvegur 59). Värdena från Nordkapp (Nydal och Lövsseth, 1983) är för januari t.o.m. mars det året (4 st.) ung. 450‰ , det lägsta $444 \pm 9\text{‰}$. Dessutom erhöles två vegetationsprov insamlade 19 augusti, 1973. Det ena, från Hliðskletti, gav en överskottsaktivitet på $425 \pm 8\text{‰}$. Det andra, från Breiðabakka, gav ett överskott på $533 \pm 10\text{‰}$, båda mätta år 1975 och förut publicerade. När det senare hade mätts visade det sig snart att den använda räknaren inte fungerade bra, så den togs ur bruk. Resterande prov brändes och mättes om år 1980 och gav då $442,6 \pm 7,0\text{‰}$. Fraktionen SOL mättes år 1983 och 1989 och gav $450,3 \pm 7,4\text{‰}$. Dessa två värden bör användas i diskussioner. Värdena för Nordkapp var i genomsnitt högre än 460‰ för motsvarande del av året. *Rumex domesticus* insamlat året därefter gav vid mätningar år 1980 ett överskott på $432,5 \pm 9,3\text{‰}$.

Den 8 och 9 augusti 1978 insamlade författaren koldioxidprov från två platser uppe på den nya lavan. Det ena togs nära rören där varmt vatten pumpades upp och det andra på ett solfatara-område närmare kratern, nära Urðaviti. Båda hade lägre aktivitet än de 4 mätta atmosfärsprov, som insamlades 23 till 27 juli på Íslands fastland (Fig. 22), vilka i sin tur hade lägre aktivitet än prov insamlade i norra Sverige (Fig. 23). Rötter från gräs insamlat nära det senare atmosfärsprovet från lavan hade en överskottsaktivitet på $315 \pm 5\text{‰}$ att jämföras med två vegetationsprov från Helgafell med överskott om 333 ± 10 respektive $336 \pm 8\text{‰}$. Ett gräsprov från Deildartunguhver, insamlat mycket nära källan, hade en klart lägre aktivitet än övriga prov insamlade några meter längre bort och de andra vegetationsproven från Ísland tagna juli 1978 (Fig. 24).

Den låga ^{14}C -aktiviteten i arktiska områden

I drygt 30 år har vi insamlat koldioxid från atmosfären. Eftersom radioaktivt kol producerades vid atombombsprov och detta ledde till ett överskott om 1000‰ på våra breddgrader, där den aktiva koldioxiden nådde troposfären från stratosfären, är det naturligt att ett latitudberoende blir skönjbart, när överskottsaktiviteten utjämnas. Den aktiva koldioxiden borde diffundera såväl norrut som söderut. Mätningar i



Figur 25 a och b. Överskottet av ^{14}C -aktiviteten för atmosfärsprov från Abisko och Svalbard för de senaste åren.

Uppsala visar på en lägre aktivitet på Svalbard än i Abisko i norra Sverige. Under det senaste decenniet har det i genomsnitt varit knappt 1‰ . Delas tiden upp i kortare perioder visar varje period en lägre aktivitet på Svalbard än i Abisko. Skillnaden visar inte någon signifikant tendens att minska med åren. Däremot har en global utjämning skett (Olsson, 1989). Figur 22, 23 och 24 visar också en klar skillnad mellan aktiviteterna i Sverige och på Ísland. Enstaka vegetationsprov från Svalbard, insamlade år 1980, visar samma tendens till lägre aktivitet där än i Sverige. I centrala Europa var aktiviteten lägre än i Sverige ända tills nyli-

gen. Det förklarades med större inflytande av fossilt bränsle, vilket även det starka säsongberoendet i centrala Europa tydde på. Eftersom denna skillnad minskat kraftigt de senaste åren och den globala utjämningen är tydlig men ingen utjämning mellan Svalbard och Abisko kan påvisas tyder det på en geofysisk skillnad mellan dessa platser. Några få prov har mätts från Grönland och Färöarna och även de tycks visa lägre aktivitet liksom de från Island. I *Figur 25* visas de allra senaste mätningarna från Abisko och Svalbard. Några av proven från Island insamlade år 1989 har mätts. De hittills föreliggande värdena tyder dock på en fortsatt lägre aktivitet på Island än i Sverige. Gamla mätningar på prov insamlade 1971 har inte heller medtagits i denna sammanställning utan skall redovisas senare.

Internationella jämförelser och felgränsernas reella betydelse

En serie jämförelser mellan laboratorier runt om i världen har visat att man i de flesta, men inte alla, laboratorier underskattar osäkerheten i sina mätningar av ^{14}C -halten. Proven har valts så att jämförelserna ger mycket lite information huruvida förbehandlingen utförts korrekt eller ej. Jämförelserna har koncentrerats på den fysikaliska mätningen. Proven har antingen varit lätta att förbehandla eller utlämnats färdiga för förbränning. Det faktum att osäkerheterna underskattats – något i vissa laboratorier och alltför mycket i andra har varit en källa för bekymmer. Det är också ett legitimt krav från arkeologer, geologer och andra att hög standard hålles i alla laboratorier. Sommaren 1989 hölls ett möte i Glasgow för att diskutera problemet (se *Radiocarbon*, vol. 32, 1990). Representanter från IAEA deltog och lovade att förvara och stå för distribution av en serie utbytesprov, som laboratorierna kan använda för kontroller med regelbundna intervall. Vidare beslöt man att laboratorierna skall ha sammanställningar tillgängliga visande aktuella serier med mätningar av bakgrund och standardprov. Laboratoriernas K-värden borde åtfölja resultatsammanställningar. Givetvis kan K-värdena variera från tid till annan. Resultaten av bestämningar på prov från IAEA kan redovisas öppet i motsats till de genomförda internationella jämförelserna. Från en grupp av laboratorierna har man tyvärr motsatt sig en öppen redovisning av resultaten vid de internationella jämförelserna, som avslutades sommaren 1989. Dessa har dock lett till att man i laboratorier med svårigheter har upptäckt misstag och arbetat med att förbättra rutinerna.

Allmänna synpunkter på tolkning av ^{14}C -resultat

På Island är risken för användning av drivved extra stor, varför man bör vara extra noggrann med den vedanatommiska analysen. Det inhemska trädslaget *Betula* skall om möjligt användas eftersom drivveden som regel består av hållbarare vedslag. Blandning av olika vedslag bör undvikas. Vid ^{14}C -analyser på isländska prov har det i flera fall visat sig att främmande trädslag har gett högre åldrar än björk. Exempel ges dock nedan då överensstämmelsen mellan *Larix* och *Betula* i prov från Tjarnargata 4 var god. Ett annat provpar *Coniferae* och *Betula*, från Herjólfsdalur visade också mycket god överensstämmelse. En vedanatommisk analys kan också ge annan värdefull information än om vedslag.

Trä och träkol kan återfinnas på en annan nivå än den som provet egentligen skulle datera. Ett enkelt fall är pålar, som drivits ner i marken. Ett annat är rötter. Guðrún Larsen, Elsa G. Vilmundardóttir och författaren kunde sålunda preparera fram kol från en rot, som letat sig ner i ett asklager strax under den markyta där växten stått och sedan förbränts vid en ny eruption, några tiotal år senare än den som gav det undre asklagret. Att rötter kan förbrännas i marken är känt och det undre lagret hade således tidigare tillskrivits en för låg ålder eftersom det daterade provet hörde till det övre lagret. Kol och t.ex. sädeskorn kan också ofta återfinnas på för låg nivå på grund av transport genom håligheter i marken. Risken för återanvändning av trä eller att man finner träkol från kasserade brända redskap måste beaktas. Plogning m.m. kan ha rört om i avlagringarna.

Förbehandling av alla prov är absolut nödvändig. Upplysning om provets belägenhet i marken och vad som har hänt provet under och efter insamlingen är därför en viktig del i kommunikationen mellan

insamlaren och den som daterar provet. En geologisk beskrivning ger en möjlighet att bedöma vad som har hänt med provet i naturen. Det konventionella laboratoriet i Uppsala har i tryck och brev uppgivit att 6 g trä eller träkol normalt bör räcka för en konventionell datering i Uppsala. Det går normalt bort upp till ungefär hälften av provet i förbehandlingen, och knappt 3 g är lagom att förbränna för att få koldioxid motsvarande 1 g rent kol, som är den mängd vi vill ha. Vi har dock exempel från Reykjavik, och annat håll, på att vissa prov var så dåliga att mycket större provmängd hade varit önskvärd. Eftersom prov kan förloras i hanteringen på grund av den mänskliga faktorn är det alltid lugnt att veta att reservprov finnes. I vissa fall vill man också gärna göra en ny förbehandling och mätning, speciellt om mycket stor vikt lägges vid ett resultat eller om något resultat är helt oväntat. På grund av överbetoningen av resultatet för Herjólfsdalur I, prov 4, U-2660 (1390 ± 60 ^{14}C -år B.P.) har resterande träkol daterats. Resultatet blev 1235 ± 55 ^{14}C -år B.P., $\delta^{13}\text{C} = -26,2\text{‰}$ (U-4549). Detta nyligen erhållna värde har ej medtagits i de redan tidigare färdigställda *figurerna 12, 13, och 26* och statistiska sammanställningarna. Det framgår att det nya värdet är knappt 2σ lägre räknat på differensen mellan resultaten. Det framgår att det är olämpligt att välja ut det till synes äldsta provet ur en serie och använda den dateringen som bevis för att en bosättning är mycket tidig. Man bör behandla resultaten ur statistisk synpunkt och även beakta att någon annan komplikation kan förrycka ett resultat. För en god bedömning av provets värde bör även förbehandlingen anges, eftersom den eftersatts på vissa håll. Även kommentarer i anslutning till normal förbehandling är av värde.

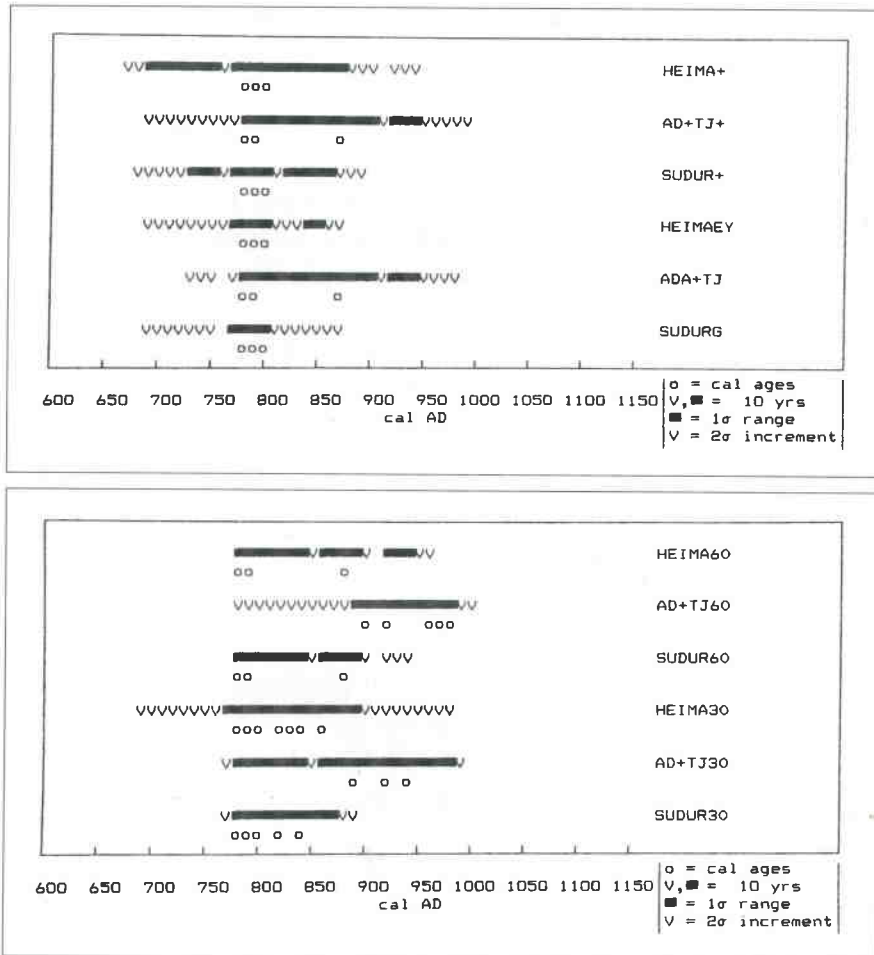
Det finns ingen som helst grund för ett påstående att ett träkolprov vid utgrävning påverkas av den inaktiva gasen från ett vulkanutbrott. Eventuell adsorberad gas försvinner vid syrabehandlingen. Däremot kan molluskskal och andra karbonatprov påverkas enligt ovan och det bör ihågkommas att det är mycket svårt att ta bort en sådan förorening. Men å andra sidan kan en kort exponering för inaktiv koldioxid knappt påverka provet märkbart. 1% inaktivt kol i ett prov gör provet 80 år för gammalt.

Många dateringar har publicerats utan att ha $\delta^{13}\text{C}$ -normaliserats. Det kan ge ett systematiskt fel för vissa provtyper eller växtslag. Björk i form av ved eller träkol tycks oftast ha ett värde mellan -25 och -28‰ . Ett prov med värdet $-26,5\text{‰}$, för vilket resultatet ännu inte är normaliserat, bör få kol-14-aktiviteten korrigerad med $2 \times 1,5\text{‰}$, så dess aktivitet korrigeras upp. Det motsvarar ungefär 24 år lägre ålder.

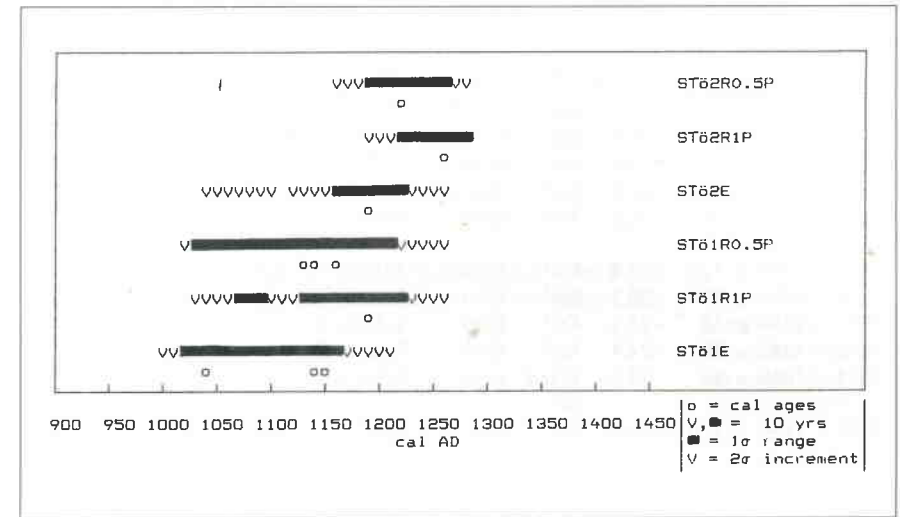
Vulkanisk koldioxid kan påverka växtligheten när plantorna ännu assimilerar och det leder till att prov från dylika tillskrives för hög ålder vid datering.

Allt tyder på att atmosfärens ^{14}C -aktivitet är lägre över Island än förväntat enligt mätningarna för kalibreringskurvorna. Det innebär att resultaten måste justeras före kalibrering.

Else Nordahls (1988) utgrävning i Reykjavik gav till resultat att det



Figur 26 a och b. Kalibrering av ^{14}C -resultat från Reykjavik och Herjólfsdalur. Medelvärdena har valts på grund av spridningen och att medelvärdena inte visar någon korrelation med förväntad ålderssekvens. Medelvärdena har också kalibrerats med utökade felgränser (+). Dessutom har medelvärdena korrigerats med såväl 30 som 60 år genom en subtraktion, på grund av den lägre aktiviteten över Island, före kalibrering. En trolig egen ålder för de flesta proven leder till att man bör subtrahera ytterligare något eller några tiotal år. Provet U-4549 är ej inkluderat eftersom det inte var klart när kalibreringen utfördes (se tabell 4).



Figur 27. Kalibrering av ^{14}C -resultat från Stöng (STÖ1E och STÖ2E) (Vilhjálmsson, 1989). Värdena har också korrigerats för den lägre aktiviteten över Island före kalibrering. Här valdes 40 och 80 år (R0,5p resp. R1,0p). Det är nu omöjligt att välja vilket värde på korrektionen som är att föredra, men år 1990 synes ett värde mellan 30 och 80 år rimligt.

fanns 3 lager (Bottom layers, Oldest Smithy och Longhouse) som tillkommit efter varandra (Suðurgata 3-5) och således borde täcka ett åldersintervall. Inom felgränserna har dessa dock fått samma ^{14}C -ålder, om viktade medelvärden tages, (1230 ± 29 , 1246 ± 31 och 1219 ± 21 år, om U-2534 hänföres till det äldsta lagret). Proven från Herjólfsdalur, daterade före år 1990, ger som medelvärde 1226 ± 20 år, om ett prov ej medtages (Hermanns-Auðardóttir, 1989) men däremot en aldrig utlämnad bestämning på *Coniferae* (U-4403: 1070 ± 75), utförd som test på grund av träslaget sedan övriga resultat från Herjólfsdalur utlämnats. De fyra bestämningarna från Aðalstræti 18 och Tjarnargata 4 ger 1169 ± 43 år. De tre lagren tillsammans från Suðurgata 3-5 ger ett medelvärde om 1228 ± 15 kol-14-år med ett K-värde 1,7. Statistiken för Herjólfsdalur ger ett K-värde 2,1. Om Reykjavíks och Herjólfsdalurs värden ovan slås ihop blir K-värdet 1,8 (alla K-värden avrundade till en decimal). Eftersom kalibreringskurvan är mycket flack för perioden 800 till 880 år e. Kr. (Fig. 21) är det omöjligt att med ^{14}C -datering särskilja prov som härrör från den tiden hur mycket man än nedbringar den statistiska osäkerheten. Resultatet skulle bli ≈ 1200 ^{14}C -år. Ett liknande svårt åldersintervall är 690 till 770 år e. Kr., som snarast ger omkring 1270 ^{14}C -år. Med hänsyn till att K-värdena för Uppsalas mätningar varit

Tabell 3. Else Nordahls prov (1988) plus två tidigare resultat från Reykjavík

U-nr	14C-ålder B.P.	$\delta^{13}C$ ‰	Material	Art	Lokal	Anmärkning
2530	1330 ± 80	-	Kol ⁴	Björk	Aðalstr. 18	SOL (Ant. -27,9‰)***
2534	970 ± 75	-26,9	Kol ²	Björk	Suðurg. 5	
2535	810 ± 70	-27,0	Kol ²	Björk	Suðurg. 5	Mycket SOL extr.
2592	1140 ± 80	-27,8	Kol ⁴	Bl.a. björk	Aðalstr. 18	
2593	960 ± 90	-25,9	Kol ⁴	Björk	Aðalstr. 18	Mycket lite utbyte (Del 1) jfr (U-2618)*
2617	1280 ± 120	-27,9	Kol ⁴	Björk	Aðalstr. 18	INS***
2618	685 ± 110	-26,2	Kol ⁴	Björk	Aðalstr. 18	(Del 2), jfr(U-2593)*
2671	1150 ± 55	-25,9	Kol ³	Björk	Suðurg. 5	
2672	1345 ± 60	-24,4	Kol ³	Björk	Suðurg. 5	
2674	1060 ± 55	-23,0	Bränd säd	Korn	Suðurg. 3	Mycket SOL extr
2675	1640 ± 270	-25,4	Trä ³	Björk	Suðurg. 5	Mycket SOL extr., litet utbyte, "svampigt", jfr SOL (U-2682)**
2676	1260 ± 55	-27,9	Kol ³	Björk	Suðurg. 5	Mycket SOL extr.
2677	1250 ± 100	-25,6	Trä ⁶	Björk	Suðurg. 3	Litet utbyte
2678	1210 ± 260 250	-26,1	Trä ³	Björk	Suðurg. 5	Mycket SOL extr. Mycket lite utbyte
2679	1080 ± 60	-24,6	Kol ³	Björk	Suðurg. 5	
2680	1375 ± 70	-26,5	Trä ²	Björk	Suðurg. 5	Mycket SOL extr. Litet utbyte
2681	1255 ± 65	-25,8	Kol ³	Björk	Suðurg. 3	
2682	1090 ± 80	-26,6	Trä ³	Björk	Suðurg. 5	SOL, jfr INS (U-2675)**
2719	1360 ± 60	-24,0	Trä ³	Björk	Suðurg. 3	
2720	1270 ± 90	-27,1	Trä ³	Björk	Suðurg. 3	
2721	1050 ± 85	-25,6	Kol ⁴	Björk	Suðurg. 5	
2739	1310 ± 70	-25,5	Kol ³	Björk	Suðurg. 3	Mycket lite SOL
2740	1280 ± 65	-25,1	Kol ⁶	Björk	Suðurg. 3	
2741	1330 ± 40	-26,9	Kol ³	Björk	Suðurg. 3	Mycket lite SOL
2742	1150 ± 60	-26,2	Kol ⁵	Björk	Suðurg. 3	
2743	1140 ± 65	-28,3	Trä ¹	Björk	Suðurg. 5	
2744	1245 ± 60	-26,1	Kol ³	Björk	Suðurg. 5	
2745	1275 ± 60	-27,4	Kol ⁴	Björk	Suðurg. 5	
2746	1090 ± 65	-26,2	Kol ⁵	Björk	Suðurg. 5	
2747	1245 ± 80	-26,2	Kol ⁵	Björk	Suðurg. 5	
2748	1205 ± 80	-	Kol ⁵	Björk & rönn	Suðurg. 5	(Ant. -26,2‰)
4030	305 ± 100	-25,4	Kol ⁴	Ej best.	Aðalstr. 14	
2082	1140 ± 70	-26,8	Trä ³	Lärk	Tjarnarg. 4	P. Einarsson
2167	1190 ± 90	-27,2	Trä ^{4,5}	Björk	Tjarnarg. 4	P. Einarsson

1 Från en plank; 2 Bit av en gren; 3 En bit; 4 Oregelbundna bitar; 5 Små bitar; 6 Små fragment; * 2 INS-fraktioner; ** 1 INS-, 1 SOL-fraktion; ***U-2617 (INS) från en förbehandling, U-2530 (SOL) från den och en annan förbehandling, men samma prov.

mycket bra, sedan vi startade med systematiska statistiska analyser, och att mätningarna härrör sig från flera års arbeten finns det anledning att verkligen utgå från dem. En bosättning utsträckt i tiden och träkol från

Tabell 4. Margrét Hermanns-Auðardóttirs prov (1989) från Heimaey

U-nr	14C-ålder B.P.	$\delta^{13}C$ ‰	Material	Art	Lokal	Anmärkning
2529	1260 ± 60	-27,3	Kol		A:I grop 1 (13)	Ingen vedanalys
2531	1060 ± 65	-26,0	Kol	Björk	A:I grop 1 (13)	
2532	550 ± 60	-27,1	Kol	Björk	A:II sek. grop (23)	
2533	1240 ± 60	-24,3	Kol	Mest gran lite lärk	A:III grop 5 (8)	Vedanalysen på resterande material, efter dateringen
2660	1390 ± 60	-25,4	Kol	Björk	A:I grop 3 (25)	
4549	1235 ± 55	-26,2	Kol	Björk	A:I grop 3 (25)	Resultat klart sen-vintern 1991* Helt ny datering av ett prov av vilket en del använts för U-2660
2661	1340 ± 65	-24,9	Kol	Björk	A:II grop 4 (31)	
2662	1240 ± 50	-26,0	Kol	Björk	A:III grop 6-7 (8)	
2663	1300 ± 60	-25,8	Kol	Björk	A:V golv, bänkar, grop (30)	
4402	1035 ± 65	-25,6	Kol	Björk	A:VIII grop 8 (364)	Resultat klart 1980
4403	1070 ± 75	-23,5	Kol	Coniferæ	A:VIII grop 8 (364)	Resultat klart för-sommaren 1982

* Resultatet för U-4549 insatt i tabellen 1997. U-4549 är ej med i figurer och de statistiska sammanställningarna, som var gjorda 1990 inför föredraget i Reykjavík

** Siffrorna inom parentes är M. H.-A:s interna provnummer

björk, som rimligtvis i genomsnitt har en viss ålder (relativt stora kolbitar hade insamlats), talar för att en ¹⁴C-ålder på cirka 1200 år skulle kunna erhållas om bosättningen varade under den traditionella *Landnámstiden*. Hallsdóttir (1987) gav 5 resultat från Lunds laboratorium på torv från Hallamýri, söder om Mosfell, Grímsnes. Dessa gav ett viktat medelvärde mellan 1170 och 1180 ¹⁴C-år, således något lägre än de från Reykjavík och Heimaey. En liknande ålder (1175 ± 75) erhöles i Uppsala (U-2808) på ett träprov från Lágafell insamlat av Haraldsson (1981).

Skillnaden mellan atmosfärens aktivitet över Sverige och Svalbard är ungefär 7,6‰, om ett viktat medelvärde tas. Spridningen är dock större än osäkerheten. En realistisk osäkerhet på det värdet kan sättas till ungefär 4‰. Med hänsyn till detta kalibreras de tre värdena, som ger medelvärderna för a) de tre lagren på Suðurgata 3-5, b) Aðalstræti och Tjarnargata 4 och c) Heimaey såsom de erhållits och med utökade felgränser med hänsyn till K-värdena, samt efter subtraktion av 60 år och 30 år men med ursprungliga felgränser (Fig. 26). Vidare ges i Figur 27 en kalibrering av medelvärderna av resultaten från Stöng (Vilhjalms-

son, 1989) före och efter motsvarande subtraktion av 80 och 40 år, men med erhållna felgränser. Motsvarande har utförts för en stor mängd resultat, men medtages inte här.

I Tabell 3 och 4 ges aktuell information om proven från Reykjavik och Heimaey. Två resultat, som tidigare publicerats i *Radiocarbon*, 11 (1969) s. 520 och 14 (1972) s. 255 och av Grimsson och Einarsson (1969), är inkluderade. Det bör också nämnas att resultat av vissa ved-anatomiska analyser inte var kända för författaren förrän helt nyligen.

Ett stort tack riktas till alla mina medarbetare under två decennier, som alla arbetat med mina isländska prov, och till alla vänner i Ísland, som hjälpt med insamling av prov, samt till Statens Naturvetenskapliga Forskningsråd, som stött mig med anslag. Dessa har inte bara använts för min egen forskning om ¹⁴C-nivån utan även för huvudparten av kostnaderna för datering av de arkeologiska proven, d.v.s. för nästan all arbetskostnad. Slutligen vill jag tacka Åsa G. Wrights minnesfond, som initierat denna sammanställning av de resultat, som hittills uppnåtts.

Referenser

- Bard, E., Hamelin, B., Fairbanks, R.G., Zindler, A., Mathieu, G., och Arnold, M., 1990. U/Th and ¹⁴C ages of corals from Barbados and their use for calibrating the ¹⁴C time scale beyond 9000 years B. P. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B52*, s. 461-468.
- Barendsen, G. W., 1955. Ouderdomsbepaling met radioactieve koolstof. Thesis, Groningen.
- Bruns, M., Levin, I., Münnich, K. O., Hubberten, H. W., och Fillipakis, S., 1980. Regional sources of volcanic carbon dioxide and their influence on ¹⁴C content of present-day plant material. *Radiocarbon*, 22, s. 532-536.
- Chatters, R. M., Crosby, J. W. III, och Engstrand, L. G., 1969. Fumarole gaseous emanations. Their influence on carbon-14 dates. I *Washington State Univ. Technical Extension Service*. Circ. 32.
- Craig, H., 1954. Carbon 13 in plants and the relationships between carbon 13 and carbon 14 variations in nature. *J. Geol.*, 62, s. 115-149.
- Craig, H., 1961. Mass-spectrometer analysis of radiocarbon standards. *Radiocarbon*, 3, s. 1-3.
- Deines, P., 1980. The isotopic composition of reduced organic carbon. I *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry* (Fritz, P. och Fontes, J. Ch., red.) vol. 1 *The Terrestrial Environment*, A. s. 329-406.
- El-Daoushy, M. F. A. F., Olsson, I. U., och Oro, F. H., 1978. The EDTA and HCl methods of pre-treating bones. *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 100, s. 213-219.
- Godwin, H., 1962. Half-life of radiocarbon. *Nature*, 195, s. 984.
- Grimsson, P. och Einarsson, P., 1969. Fornminjar i Reykjavik og aldursgreiningar. *Árbók Hins íslenska fornleifafélags*, s. 80-97.
- Gulliksen, S., 1980. Isotopic fractionation of Norwegian materials for radiocarbon dating. *Radiocarbon*, 22, s. 980-986.
- Hallsdóttir, M., 1987. Pollen analytical studies of human influence on vegetation in relation to the Landnám tephra layer in southwest Iceland. *Lundqua Thesis*, 18, s. 1-45.
- Haraldsson, H., 1981. The Markarfljót sandur area, southern Iceland. Sedimentological, petrographical and stratigraphical studies. Thesis. *Striae*, 15, s. 1-65.
- Hermanns-Auðardóttir, M., 1989. Islands tidiga bosättning. Thesis. *Studia Archaeologica Universitatis Umensis*, 1, s. 1-183.
- Håkansson, S., 1983. A reservoir age for the coastal waters of Iceland. *Geol. Fören. Stockholm Förh.* 105, s. 64-67.
- Hörnsten, Å. och Olsson, I. U., 1964. En ¹⁴C-datering av glaciallera från Lugnvik, Ångermanland. *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 86, s. 206-210.
- Johansen, O. S., Gulliksen, S., och Nydal, R., 1986. ¹³C and diet: Analysis of Norwegian human skeletons. *Radiocarbon*, 28, s. 754-761.
- Kigoshi, K. och Hasegawa, H., 1966. Secular variation of atmospheric radiocarbon concentration and its dependence on geomagnetism. *J. Geophys. Res.*, 71, s. 1065-1071.

- Lerman, J. C., Mook, W. G., och Vogel, J. C., 1970. C14 in tree rings from different localities. I *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*, Nobel Symposium 12 (Olsson, I. U., red.) s. 275-301. Almqvist & Wiksell, Stockholm och J. Wiley & Sons, New York, London, och Sydney.
- Libby, W. F., 1955. *Radiocarbon Dating* Univ. Chicago Press.
- Libby, L. M. och Libby, W. F., 1973. Vulcanism and radiocarbon dates. I *Proc. 8th International Conf. on Radiocarbon Dating*, Lower Hutt, New Zealand, 1972, s. A72-A75.
- van der Merwe, N. J. och Vogel, J. C., 1978. ¹³C content of human collagen as a measure of prehistoric diet in woodland North America. *Nature*, 276, s. 815-816.
- Münnich, K. O., 1957. Heidelberg natural radiocarbon measurements I. *Science*, 126, s. 194-199.
- Nordahl, E., 1988. Reykjavik from the archaeological point of view. *Aun*, 12, s. 1-150.
- Nydal, R. och Lövsseth, K., 1983. Tracing bomb ¹⁴C in the atmosphere 1962-1980. *J. Geophys. Res.*, 88, No C6, s. 3621-3642.
- Nydal, R., Lövsseth, K., och Skogseth, F. H., 1980. Transfer of bomb ¹⁴C to the ocean surface. *Radiocarbon*, 22, s. 626-635.
- Olsson, I. U., 1968. Modern aspects of radiocarbon datings. *Earth-Science Reviews*, 4, s. 203-218.
- Olsson, I. U. (red.), 1970. *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*. Nobel Symposium 12, Uppsala, Aug. 11-15, 1969 Almqvist & Wiksell, Stockholm och J. Wiley & Sons, New York, London och Sydney.
- Olsson, I. U., 1974. The eighth international conference on radiocarbon dating. *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 96, s. 37-44.
- Olsson, I. U., 1980. Content of ¹⁴C in marine mammals from northern Europe. *Radiocarbon*, 22, s. 662-675.
- Olsson, I. U., 1983. ¹⁴C-datering - populär genomgång av laboratoriearbetet och syn på felkällor. I *Bua Västergård - en 8000 år gammal kustboplats* (Andersson, S., Kaelas, L., och Wigforss, J., red.) *Arkeologi i Väst-sverige*, 1. GAM, s. 203-221.
- Olsson, I. U., 1988. Low-level counting using gas-filled counters as applied to ¹⁴C dating with emphasis on reliability. I *Low-level measurements and their applications to environmental radioactivity* (Garcia-Leon, M. och Madurga, G., red.) s. 171-223. World Scientific, Singapore, New Jersey och Hong Kong.
- Olsson, I. U., 1989. Recent ¹⁴C activity in the atmosphere, "clean air" and the Chernobyl effect. *Radiocarbon*, 31, s. 740-746.
- Olsson, I. U., El-Daoushy, M. F. A. F., Abd-El-Mageed, A., och Klasson, M., 1974. A comparison of different methods for pretreatment of bones. I *Geol. Fören. Stockholm Förh.* 96, s. 171-181.
- Olsson, I. U., Göksu, Y., och Stenberg, A., 1968. Further investigations of storing and treatment of Foraminifera and mollusks for ¹⁴C dating. *Geol. Fören. Stockholm Förh.*, 90, s. 417-426.
- Olsson, I. U., Holmgren, B., och Skye, E., 1984. Questions arising when using lichen for ¹⁴C measurements in climatic studies. I *Climatic Changes on a Yearly to Millennial Basis* (Mörner, N.-A. och Karlén, W., red.), Proc. 2nd Symp. on Climatic Studies and Related Problems, s. 303-308.
- Olsson, I. U., Karlén, I., Turnbull, A. H., och Prosser, N. J. D., 1962. A determination of the half-life of C¹⁴ with a proportional counter. *Arkiv Fysik*, 22, s. 237-255.
- Olsson, I. U. och Osadebe, F. A. N., 1974. Carbon isotope variations and fractionation corrections in ¹⁴C dating. *Boreas*, 3, s. 139-146.
- Pearson, G. W. och Stuiver, M., 1986. High-precision calibration of the radiocarbon time scale 500-2500 BC. *Radiocarbon*, 28, s. 839-862.
- Saupé, F., Strappa, O., Coppens, R., Guillet, B., och Jaegy, R., 1980. A possible source of error in ¹⁴C dates: Volcanic emanations (Examples from the Monte Amiata district, provinces of Grosseto and Siena, Italy). *Radiocarbon*, 22, s. 525-531.

- Šilar, J., 1976. Radiocarbon ground-water dating in Czechoslovakia - first results. *Věstník Ústředního Ústavu Geologického*, 51, s. 209-220.
- Sonninen, E., Jungner, H., och Erämetsä, P., 1985. Dating of mortar and bricks from the castle of Kastelholm. *ISKOS*, 5, s. 384-389.
- Stuiver, M., 1978. Radiocarbon timescale tested against magnetic and other dating methods. *Nature*, 273, s. 271-274.
- Stuiver, M. och Pearson, G. W., 1986. High-precision calibration of the radiocarbon time scale AD 1950-500 BC. *Radiocarbon*, 28, s. 805-838.
- Stuiver, M., Pearson, G. W., och Braziunas, T. F., 1986. Radiocarbon age calibration of marine samples back to 9000 cal yr BP. *Radiocarbon*, 28, s. 980-1021.
- Stuiver, M. och Reimer, P. J., 1986. A computer program for radiocarbon age calibration. *Radiocarbon*, 28, s. 1022-1030.
- Sulerzhitzky, L. D., 1970. Radiocarbon dating of volcanoes. *Bull. Volcanologique*, 35, s. 85-94.
- Säve-Söderbergh, T. och Olsson, I. U., 1970. C14 dating and Egyptian chronology. I *Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*, Nobel Symposium 12 (Olsson, I. U., red.), s. 35-55. Almqvist & Wiksell, Stockholm och J. Wiley & Sons, New York, London, och Sydney.
- Tauber, H., 1983. ¹⁴C dating of human beings in relation to dietary habits. *PACT*, 8, s. 365-375.
- Taylor, R. E., 1980. Radiocarbon dating of Pleistocene bone: Toward criteria for the selection of samples. *Radiocarbon*, 22, s. 969-979.
- Taylor, R. E., 1987. *Radiocarbon Dating. An Archaeological Perspective*. Academic Press, Inc. Orlando.
- Vilhjálmsdóttir, V. Ö., 1989. Stöng og Tjorsardalur-bosættelsens ophör. *Hikuin*, 15, s. 75-102.
- de Vries, Hl., 1956 a. Purification of CO₂ for use in a proportional counter for ¹⁴C age measurements. *Appl. Sci. Res.*, Sect. B, 5, s. 387-400.
- de Vries, Hl., 1956 b. The contribution of neutrons to the background of counters used for C¹⁴ age measurements. *Nuclear Physics*, 1, s. 477-479.
- de Vries, Hl., 1957 a. The removal of radon from CO₂ for use in ¹⁴C measurements. *Appl. Sci. Res.*, Sect. B, 6, s. 461-470.
- de Vries, Hl., 1957 b. Further analysis of the neutron component of the background of counters used for ¹⁴C age measurements. *Nuclear Physics*, 3, s. 65-68.
- de Vries, Hl., 1958. Variation in concentration of radiocarbon with time and location on Earth. *Proc. Koninkl. Nederl. Akademie van Wetenschappen - Amsterdam*, Ser. B, 61, No. 2, s. 94-102.
- de Vries, Hl. och Barendsen, G. W., 1952. A new technique for the measurement of age by radiocarbon. *Physica*, 18, s. 652.
- de Vries, Hl. och Barendsen, G. W., 1953. Radiocarbon dating by a proportional counter filled with carbondioxide. *Physica*, 19, s. 987-1003.
- de Vries, Hl. och Barendsen, G. W., 1954. Measurements of age by the carbon-14 technique. *Nature*, 174, s. 1138-1141.
- de Vries, Hl., Barendsen, G. W., och Waterbolk, H.T., 1958. Groningen radiocarbon dates II. *Science*, 127, s. 129-137.
- de Vries, Hl. och Waterbolk, H.T., 1958. Groningen radiocarbon dates III. *Science*, 128, s. 1550-1556.

Minningarsjóður Ásu Guðmundsdóttur Wright

var stofnaður árið 1968. Hann er í vörzlu Þjóðminjasafns Íslands og skal standa straum af heimsóknum erlendra fræðimanna, er boðnir eru samkvæmt settum reglum til að flytja fræðilega fyrirlestra á vegum Þjóðminjasafnsins. Sjóðinn gaf frú Ása til minningar um eftirtalda ættingja og vandamenn sína:

Foreldra hennar Arndísi Jónsdóttur háyfirdómara Péturssonar (1857–1936) og Guðmund Guðmundsson lækni (1853–1946).

Mann hennar Henry Newcome Wright, LLD., F.R.G.S., F.L.S., F.R.A.S. (1884–1955).

Systkini hennar Sturlu Guðmundsson 1883–1910, Sigþrúði Guðmundsdóttur (1884–1905), og Þóru Guðmundsdóttur Hermannsson (1888–1918).

Móðursystur hennar Þóru Jónsdóttur (1858–1947) og Jón Magnússon forsætisráðherra (1859–1926).

Móðurbræður hennar Friðrik Jónsson, cand theol. (1860–1938) og Sturlu Jónsson kaupmann (1861–1947).

Stjórn sjóðsins skipa: Þór Magnússon þjóðminjavörður, dr. Sturla Friðriksson og dr. Jónas Kristjánsson.

