

Zur Frage der Zuverlässigkeit und Brauchbarkeit der Radiocarbon-(C¹⁴-)Methode in Vorgeschichtsforschung und Quartärgeologie

von Hugo Groß, Bamberg

Daß neue Hypothesen und neue wissenschaftliche Arbeitsmethoden in der Regel bei den in Betracht kommenden Wissenschaftlern zunächst auf Mißtrauen oder gar Ablehnung stoßen, bevor das Neue sich nach genügend langer Entwicklung, Erprobung und Bewährung als brauchbar und zuverlässig erwiesen hat, ist durchaus zu verstehen und gutzuheißen. Es darf aber der Grund für diese Ablehnung nicht schon die Tatsache sein, daß eine neue Arbeitsmethode Erkenntnisse, die auf anderen Wegen erworben und seit langem wesentliche Bestandteile von Lehrmeinungen geworden sind, als ungenau oder gar falsch erweist und zum Umlernen zwingt. Die Ablehnung muß sich selbstverständlich auf eine genaue Kenntnis der Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen der neuen Arbeitsmethode stützen können. Da man das bei einem von den Geisteswissenschaften herkommenden Prähistoriker oder Quartärgeologen in der Regel nicht voraussetzen kann, wenn es sich z. B. um eine physikalische Methode handelt wie die Radiocarbon-(C¹⁴-)Methode, sollte man erwarten, daß die Kritiker vor der Publikation ihr Manuskript einem zuständigen Spezialisten zur Prüfung vorlegen. Das hat aber V. Miložić (1957) bei seinem heftigen Angriff auf die C¹⁴-Methode als Datierungsverfahren in der Vorgeschichtsforschung bestimmt nicht getan „auf die Gefahr hin, daß sich manches, oder sogar alles, als Mißverständnis eines Laien erweist“ (V. Miložić 1957, S. 104)!!

Die Berechtigung dieses Angriffs haben bereits ein Prähistoriker und ein C¹⁴-Physiker (H. Schwabedissen und K. O. Münnich 1958) überzeugend widerlegt. Da aber der Angriff von V. Miložić die biophysikalischen Grundlagen der Radiocarbon-Methode als unsicher bezeichnet und damit die Brauchbarkeit dieser Methode ganz allgemein, also auch in der Quartärgeologie, in Frage stellt, ist eine Abwehr dieses Angriffs auch im Jahrbuch „Quartär“ angebracht, um zu verhüten, daß Prähistoriker und Quartärgeologen entmutigt werden und keine Proben mehr für die C¹⁴-Datierung sammeln. Daß gerade Prähistoriker — V. Miložić ist längst nicht der einzige — mehr als Quartärgeologen immer wieder Bedenken gegen die Anwendung der C¹⁴-Methode vorbringen, liegt einmal in der bei ihnen weit verbreiteten Abneigung gegen naturwissenschaftliche Methoden in ihrem Fach, das sie aber, wie zuletzt H. Schwabedissen (1958; vgl. auch H. Groß 1957a) überzeugend dargelegt hat, nicht missen darf, zweitens in der für die jüngeren Perioden der Vorgeschichte oft noch zu großen Streuung der C¹⁴-Daten und drittens in der Tatsache, daß in den ersten Jahren die Libbysche Methode,

die mit festem C arbeitete, Daten mit gar zu großem Streumaß, aber bisweilen auch solche lieferte, die offensichtlich sehr ungenau oder gar falsch waren. V. Miložić (1957) hat mit einer Ausnahme (Egolzwil 3) nur die Methode von W. F. Libby berücksichtigt. Inzwischen ist die C¹⁴-Methode durch die Hl. de Vries in Groningen und H. E. Suess in Washington zu verdankende Einführung des Gaszählrohrs erheblich verbessert worden (H. Groß 1957b); die Meßtechnik ist so vervollkommen worden, daß durch andere Methoden als ungenau oder falsch erwiesene C¹⁴-Daten auf nicht einwandfreie Probenentnahme oder auf Verunreinigung der Proben zurückzuführen sind.

Da die meisten Einwände gegen die Brauchbarkeit der C¹⁴-Methode immer wieder von Prähistorikern kommen, ist zunächst die Frage zu beantworten: Wie ist die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der archäologischen Datierung im absoluten Zeitmaß zu beurteilen? V. Miložić (1949) selbst hat die Unterlagen für die Beantwortung dieser Frage geliefert. Mit seiner „komparativ-stratigraphischen Methode“ hat er durch Auswertung von Importfunden aus den frühgeschichtlichen Kulturgebieten im östlichen Mittelmeerraum und im Zweistromland eine Chronologie im absoluten Zeitmaß für das Neolithikum Mittel- und Südosteuropas aufgestellt; seine zahlreichen regionalen Zeittafeln sowie seine große imponierende Zeittafel am Schluß des Buches machen den Eindruck großer Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Die typologische Fernkonnektierung durch diese komparativ-stratigraphische Methode hat zur Voraussetzung, daß die frühgeschichtlichen Daten im östlichen Mittelmeerraum zuverlässig sind und daß die für die Fernkonnektierung von dort bis Mitteleuropa benutzten Importfunde in den Herkunftsländern nur kurze Zeit in Gebrauch waren (was bei Metallsachen, die dabei die Hauptrolle spielen, meistens nicht der Fall war) und bald nach ihrer Anfertigung nach dem Norden gelangt sind. Diese Voraussetzungen sind aber, wie V. Miložić (1949) selbst zugibt, nur zu einem kleinen Teil erfüllt, was auch H. Schwabedissen (1958) hervorhebt, insbesondere hat es sich herausgestellt, daß die Zahl der für eine solche typologische Fernkonnektierung in Frage kommenden Artefakttypen sehr viel kleiner ist, als man früher angenommen hat. Vor allem aber ist die frühgeschichtliche Chronologie größtenteils recht unsicher, wie auch V. Miložić (1949, S. 8 f., S. 11) zugibt. Sie beruht bekanntlich auf Herrscherlisten, die eine schwebende Chronologie darstellen, in welcher durch astronomische Berechnungen (Finsternisse) nur einzelne Jahre genau festgelegt werden konnten. So gibt es für das alte Ägypten mehrere verschiedene Chronologien. Ebenso sind auch im Zweistromland die älteren frühhistorischen Daten mit einem Unsicherheitsfaktor belastet; für das Datum der Thronbesteigung Hammurabis zum Beispiel ist der Spielraum der Datierung bei den verschiedenen Archäologen sogar 350 Jahre groß (W. F. Libby 1954a), so daß man ihn mit der C¹⁴-Methode in Chicago einzuengen versucht hat.

Für die Metallzeiten nördlich des Mittelmeergebietes, sogar für die Bronzezeit, aus der weit mehr Importfunde, besonders aus dem frühhistorischen Italien, bekannt sind, sind die Möglichkeiten einer zuverlässigen typologischen Fernkonnektierung zur Aufstellung einer absoluten Chronologie in Mitteleuropa nicht viel größer (H. Schwabedissen 1958b). Hier sind nach V. Miložić (1949, S. 2, 3) die Daten im absoluten Zeit-

maß „bereits von der Mitte des 1. Jahrtausends an vollkommen unsicher“, d. h. vor 500 v. Chr. sind die absoluten Daten der Vorgeschichte in Mitteleuropa eigentlich nur \pm gut gelungene Schätzungen (die übrigens mehrfach durch die C¹⁴-Methode als richtig bestätigt worden sind). Weder der Beginn des Neolithikums, noch der Bronzezeit konnte mit Hilfe der komparativ-stratigraphischen Methode auch nur einigermaßen genau ermittelt werden (V. Milošević 1949, S. 2, 3). Kein Prähistoriker konnte bisher die Zeitstellung des ältesten Jericho und Jarmo sowie der ältesten Linearbandkeramik mit archäologischen Methoden im absoluten Zeitmaß feststellen, erst recht nicht für die mesolithischen und paläolithischen Kulturschichten; in allen diesen Fällen ist der Prähistoriker für die relative und absolute Zeitbestimmung auf naturwissenschaftliche Verfahren angewiesen.

Dazu kommt, daß die Entwicklung der materiellen Kultur auch in einem nicht besonders großen Raum nicht überall gleichzeitig erfolgte und daß es bei den Kultur-elementen verschiedener Orte und verschiedener Zeiten Parallelerscheinungen ohne genetische Zusammenhänge geben kann, wie auch V. Milošević (1949, S. 4) annimmt. Auch aus diesem Grunde braucht der Prähistoriker eine zuverlässige naturwissenschaftliche Methode, die Zeitbestimmungen im absoluten Zeitmaß ermöglicht.

Die frühhistorischen Daten unterscheiden sich von den historischen in den allermeisten Fällen durch eine oft erheblich geringere Genauigkeit. Bei den prähistorischen Daten kann dieser Spielraum der Datierung natürlich noch größer sein. Trotzdem wirft V. Milošević (1958) der Radiocarbon-Methode vor, daß ihre Zeitbestimmungen keine Daten „in historischem Sinne“ seien. Selbstverständlich ist der Vorgeschichtsforschung auch mit Hilfe der komparativ-stratigraphischen Methode „keine zeitliche Fixierung im historischen Sinne“ für früh- und prähistorische Ereignisse (etwa Baubeginn der Cheops-Pyramide und von Stonehenge oder Anlage des „Königsgrabes“ von Seddin) möglich, obwohl V. Milošević (1957) auch heute noch die Ansicht vertritt, daß diese Methode „zu einer gemeinsamen, alle verpflichtenden Sprache in den Fragen der absoluten und relativen Chronologie geführt“ habe. Die von V. Milošević (1949) veröffentlichten neolithischen Zeittafeln täuschen eine Genauigkeit vor, die nicht vorhanden ist und nach den Ausführungen des Verfassers im Text gar nicht möglich sein kann; sein Kollege R. Pittioni (1955, S. 803, Anm. 299) sagt mit Bezug auf Mähren, V. Miloševićs „absolute Chronologie (Übersichtstabelle) nimmt weder auf das Problem des Grundkeramikums und seiner Herkunft noch auch auf die allgemein-altweltliche chronologische Situation Rücksicht. Demgemäß sind auch die von ihm gebotenen Zahlen bloß als Schätzwerte ohne fachlich erarbeitete Basis aufzufassen. Sie bestätigen bloß die Notwendigkeit, über die auf dem Wege der Querverbindung mit datierbaren frühen Stadtkulturen gezogenen Verbindungen hinaus die neuen absolutchronologischen Methoden zur sachgemäßen Durchdringung der Problemlage heranzuziehen“.

Die zweite Frage, die in diesem Zusammenhang zu beantworten ist, lautet: Wie groß ist die Reichweite und Genauigkeit der C¹⁴-Methode und durch welche Methoden kann ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit kontrolliert werden? Die von Atomphysikern (nicht Atomchemikern, wie V. Milošević schreibt) mit der C¹⁴-Methode ausgeführ-

ten Datierungen können ebensowenig wie die archäologische komparativ-stratigraphische Methode eine „zeitliche Fixierung im historischen Sinne“ für prähistorische oder geologische Ereignisse im Spätquartär erreichen und wollen es daher natürlich auch gar nicht. Denn der radioaktive Zerfall des Kohlenstoff-Isotops C^{14} ist wie jeder radioaktive Zerfall ein akausaler Vorgang und jedes Meßergebnis daher statistischen Schwankungen unterworfen. Deswegen wird den C^{14} -Daten mit \pm der „mittlere Fehler“ angehängt, der nicht, wie von Laien vielfach angenommen wird, ein bestimmter Spielraum, sondern als statistisches Streumaß ein Genauigkeitsmaß der C^{14} -Datierung ist (vgl. H. E. Suess 1956, K. O. Münnich 1957b, c, S. 41—49, H. Groß 1957b, S. 143, 144). Dieser „mittlere Fehler“, der mit dem Alter der Probe natürlich zunimmt, ist in den letzten Jahren besonders in Groningen erheblich verkleinert worden; Voraussetzung dafür ist, daß die zur Messung zur Verfügung gestellte Probe genügend groß ist. „Angenommen, der C^{14} -Gehalt einer Probe sei gerade so groß, daß in genau zehn Stunden im Mittel 10 000 C^{14} -Atome zerfallen; wiederholt man diese je zehn Stunden dauernde Messung viele Male und zeichnet die Häufigkeit, mit der eine Abweichung vom richtigen Wert 10 000 auftrat, als Kurve (Verteilungs- oder Gauß-Kurve, die man auch theoretisch vorausberechnen kann) auf, so kann man feststellen: 68 % aller vorgekommenen Abweichungen sind kleiner als ± 100 (d. h. 1 %), 95 % sind kleiner als ± 200 , und Abweichungen größer als ± 300 schon äußerst unwahrscheinlich (nur 0,3 %). Daher bedeutet eine Altersangabe $20\,000 \pm 500$ Jahre, daß das wahre Alter mit 68 % Wahrscheinlichkeit zwischen 20 500 und 19 500, mit 95 % zwischen 19 000 und 21 000 liegt usw. (K. O. Münnich, briefl. Mitteil. vom 16. 12. 1956; vgl. K. O. Münnich 1957c).

W. F. Libby (1954a) hat zur Prüfung der Genauigkeit seiner C^{14} -Methode (mit festem C) einen verkohlten Balken aus einem ca. 250 Jahre vor der Thronbesteigung Hammurabis gebauten Haus in Nippur in drei gleiche Teile (C-752 I—III) geteilt und für jeden Teil die Zählung der C^{14} -Zerfälle auf fast einen Monat (übliche Zähldauer 12—48 Stunden) ununterbrochen ausgedehnt; er erhielt $4,029 \pm 0,05$, $4,085 \pm 0,07$ und $4,156 \pm 0,13$ cpm/g (oder dpm/g = Zerfälle pro 1 g C in 1 Minute); bei rezentem Holz war die Radioaktivität im gleichen Apparat gemessen 6,68 cpm/g. Ferner hat W. F. Libby (1954b) zwei Proben von dem gleichen mayazeitlichen Holzstück je sechs Wochen lang getrennt gemessen und die C^{14} -Daten C-949: 433 ± 170 n. Chr. und C-948: 469 ± 120 n. Chr. erhalten. Daher ist es bei genügend großen Proben notwendig und üblich, das Mittel von zwei oder mehr Messungen als C^{14} -Daten zu berechnen.

Bequemer als durch sehr lange Meßdauer erhält der C^{14} -Physiker eine größere Genauigkeit durch die Anwendung größerer Proben (J. L. Kulp und Mitarb. 1952, S. 414) und Messung des C^{14} -Gehalts in gasförmigen C-Verbindungen (Azetylen, Methan, am häufigsten Kohlendioxyd), in welche der Kohlenstoff der Probe übergeführt wird; dieses Verfahren hat auch den Vorzug, daß eine Verunreinigung mit dem C^{14} der Atmosphäre, wie sie bei der Verwendung von festem C (infolge seiner riesigen Oberfläche) nach Beginn der Atombombenversuche anfangs vorgekommen ist, ausgeschlossen ist. Falls die Proben groß genug sind, kann in einem großen Zählrohr durch die Anwendung eines Fülldrucks von mehreren at eine größere Genauigkeit und eine Vergröße-

zung der Reichweite auf ca. 53 000 Jahre, bei Proben mit mindestens 500 g C auf ca. 70 000 Jahre (in Groningen) erzielt werden (Hl. de Vries 1958a, H. Haring, A. E. de Vries und Hl. de Vries 1958). Das erste nach diesem Verfahren erzielte und veröffentlichte C¹⁴-Datum ist für eine Altwürm-Phase (W I, Soergel) in Italien (Agro Pontino) mit 65 000 Jahren vor heute ermittelt worden (A. C. Blanc 1958), das zweite Datum für das erste Altwürm-Interstadial Amersfoort XII (vgl. H. Groß 1958, S. 182) in Holland Gro-1397: $64\,000 \pm 1100$ vor heute (H. Haring u. Mitarb. 1958).

Es ist aber natürlich auch mit den modernsten Verfahren der C¹⁴-Datierung „keine zeitliche Fixierung im historischen Sinne möglich“, ebensowenig wie mit der komparativ-stratigraphischen archäologischen Methode. Eine C¹⁴-Datierung auf 37 oder gar 10 Jahre genau ist leider eine physikalische, aber auch eine archäologische Unmöglichkeit. Der leider unvermeidliche \pm „mittlere Fehler“ hat zur Folge, daß von zwei nicht gar zu verschiedenen C¹⁴-Daten die wahren Daten ganz oder nahezu identisch sein können.

Voraussetzung für eine zuverlässige C¹⁴-Datierung im Rahmen des Möglichen ist natürlich, daß die zu datierende Probe genügend groß und auch sonst wirklich einwandfrei ist. Sie darf nicht durch Kalk mit „totem“ C scheinbar älter oder durch hartes Grundwasser (K. O. Münnich 1957a, b) oder durch rezente Durchwurzelung oder durch von Sickerwasser infiltrierte jüngere kohlenstoffhaltige Substanzen (z. B. Humus aus dem A-Horizont des Bodens) scheinbar verjüngt sein. Beide Verunreinigungen können bei genügend großen Proben durch Vorbehandlung mit verdünnter Salzsäure und danach mit verdünnter Natronlauge beseitigt werden (K. O. Münnich 1957b, Hl. de Vries 1958a, Hl. de Vries und G. W. Barendsen 1954). Kalkhaltige organogene Proben wie unverkohlte Knochen und Geweihe können in hartem Grundwasser durch Isotopentrenneffekte für die C¹⁴-Datierung in der Regel oder oft unbrauchbar gemacht werden (K. O. Münnich 1957a, b, H. Groß 1957b). Eine weitere Voraussetzung ist die richtige relative Datierung der ungestörten Fundschicht, in Höhlen bei Holzkohlen, die durch wühlende Tiere verschleppt sein können, eine oft unerfüllbare Voraussetzung. In Höhlen muß die relative Datierung der Fundschicht am besten mit Hilfe der granulometrischen Methode erfolgen. Steht das C¹⁴-Datum einer einwandfreien und richtig entnommenen Probe mit der relativen archäologischen oder quartärgeologischen Datierung in Widerspruch, so sind letztere als falsch anzusehen.

Zur direkten Kontrolle der C¹⁴-Daten zwischen 16 000 und 70 000 vor heute kämen, wenn sie zuverlässig wären, nur die für das ganze Pleistozän für die Oberfläche der Atmosphäre berechnete Sonnenstrahlungskurve von M. Milankovitch, die aber von den allermeisten Quartärgeologen als Zeitskala des Quartärs abgelehnt wird (M. Schwarzbach 1950, 1954, P. Woldstedt 1954), und die Paläotemperaturkurve von C. Emiliani (1955, 1956, 1958) in Betracht, die mit Hilfe der O¹⁸-Analyse von Tiefsee-Bohrkernen ermittelt, aber wohl noch nicht genau genug durchdatiert ist (sie ist für das Pleistozän von Günz ab nur halb so lang wie die Milankovitch-Kurve). Diese alten Daten können sich nur gegenseitig kontrollieren, da stratigraphisch völlig oder annähernd gleichaltrige Proben entsprechende \pm übereinstimmende Daten liefern müssen, was

auch tatsächlich der Fall ist (z. B. Paudorfer Verlehmungszone im Lößprofil datiert durch Holzkohle jungpaläolithischer Kulturschichten). Mit Holzkohle ermittelte Daten von ungestörten Kulturschichten in Höhlen, auf Grund der granulometrischen Sedimentanalyse dem Interstadial W I/II zwischen Alt- und Hauptwürm, d. h. dem Göttweiger Interstadial (vorläufige Datierung ca. 44 000 bis 29 000 vor heute) zugewiesen, liegen zwischen 34 000 und 29 000 vor heute (H. Groß 1958).

Eine Kontrolle von C^{14} -Daten jünger als 16 000 vor heute ist mit folgenden Methoden direkt möglich: Durch die Warwengeochronologie, die im Ostseegebiet durchaus nicht so unsicher ist, wie V. Milošević (1957) meint, konnten einige C^{14} -Daten als richtig bestätigt werden, was dafür spricht, daß die Zeitskala von G. und E. H. De Geer der Größenordnung nach stimmt (E. H. De Geer 1951). Die Jüngere Dryaszeit (= Salpauselkä-Stadium, DA III Firbas¹) dauerte nach der Warwengeochronologie von ca. 8800 bis 7912 (abgerundet: 8000) v. Chr. = ca. 10 750 bis 9950 vor heute. Für den Beginn dieser Periode (DA-Grenze II/III) liegen die Kopenhagener C^{14} -Daten 10 770 und als Mittel von fünf Messungen 10 830 Jahre vor heute (Johs. Iversen 1953) sowie eine englische, 10 834 vor heute, vor (H. Godwin u. Mitarb. 1957). Die bisher für verschiedene Bildungen aus der Jüngeren Dryaszeit ermittelten dreizehn C^{14} -Daten liegen zwischen 10 770 und 10 324 vor heute. Das Ende dieser Periode (DA-Grenze III/IV) ist warwengeochronologisch rund 8000 v. Chr. (genauer nach G. De Geer 1940: 7912) = 9950 vor heute, aber die beiden einzigen C^{14} -Daten für Gyttya dieser DA-Grenze (aus Nordengland Q-151: $10\,263 \pm ca. 350$ vor heute nach H. Godwin und Mitarb. 1957, aus Dänemark K-111: $10\,300 \pm 350$ vor heute nach Johs. Iversen 1953) weichen übereinstimmend davon etwas ab, wenn man nicht den „mittleren Fehler“ beachtet.

Die Pollenanalyse ermöglicht für sich allein nur die Aufstellung einer relativen Chronologie, die wie die Warwengeochronologie nur die letzten ca. 16 000 Jahre umfaßt, aber durch sie im absoluten Zeitmaß größtenteils (E. Fromm 1938) oder wenigstens teilweise geeicht werden kann (H. Groß 1957a). Aber die Pollenanalyse kann prüfen, ob Moorschichten mit genügend übereinstimmenden C^{14} -Daten auch die gleiche Diagrammlage haben, also wirklich \pm genau gleich alt sind. Das ist tatsächlich der Fall: für die pollenanalytisch und meist auch stratigraphisch zuverlässig erkennbaren Schichten des späteiszeitlichen Alleröd-Interstadials (DA II) sind in Europa von Spanien bis Nordengland und Dänemark rund fünfzig C^{14} -Daten ermittelt, die zwischen 11 900 und 10 600 Jahren vor heute liegen, nur vier davon weichen ein wenig nach oben bzw. nach unten ab (H. Groß 1958). Für Schichten der nach den Pollendiagrammen etwas älteren Böllingschwankung (DA Ib) in Spanien, Holland und Mitteldeutschland liegen die C^{14} -Daten übereinstimmend zwischen 13 700 und 12 200 Jahren vor heute (H. Groß 1958). Das Ende des Letzten Interglazials (Eem = Riß/Würm) liegt nach ca. acht Groninger C^{14} -Datierungen in Holland (Amersfoort), Schleswig-Holstein (Loopstedt), Dänemark (Brörup), Bayern (Großweil) und Schweiz (Drachenloch) übereinstimmend mehr als 50 000, nach neuesten Messungen mehr als 65 000 Jahre zurück.

¹ DA = Diagramm-Abschnitt nach F. Firbas (1949).

Der Diagrammhorizont DA VII/VIII, d. h. der Beginn des Subboreals in Deutschland, ist von F. Firbas (1949) mit ca. 2500 v. Chr. datiert worden; in einem Schwarzwaldmoor wurde dafür das C¹⁴-Datum Gro-273: 4465 ± 140 (= 2615 ± 140 v. Chr.) ermittelt (Hl. de Vries u. Mitarb. 1958, S. 133). Der Diagrammhorizont DA VI/VII ist von F. Firbas (1949) mit ca. 4000 v. Chr. datiert worden; für die Richtigkeit dieser Datierung spricht der Beginn der Getreidepollenkurve in der oberen Hälfte des DA VI im ehemaligen Gaterslebener See bei Aschersleben in Mitteldeutschland (H. Müller 1953), denn in der Nähe (Westeregeln bei Magdeburg) ist die älteste Getreideprobe einer linearbandkeramischen Siedlung durch die C¹⁴-Methode mit 6200 ± 200 Jahren vor heute (= 4250 ± 200 v. Chr.) datiert worden (Hl. de Vries und G. W. Barendsen 1954). Dieses frühe C¹⁴-Datum für die älteste Linearbandkeramik hat viele Prähistoriker besonders erbost, es wird aber gestützt durch das nur wenig jüngere Datum aus Bayern und drei ungefähr ebenso alte aus Holland (Hl. de Vries und G. W. Barendsen 1954, Hl. de Vries, G. W. Barendsen und H. T. Waterbolk 1958). Umgekehrt haben die Prähistoriker in der Regel die Ertebölle-Kultur für erheblich älter gehalten, als sie nach den pollenanalytischen Befunden, deren Richtigkeit durch die C¹⁴-Messung bestätigt wurde, wirklich sind (J. Troels-Smith 1953). Auf Grund der Keramik haben die Prähistoriker die neolithische Siedlung Ehrenstein bei Ulm in die späte Jungsteinzeit (um 2000 v. Chr.) gestellt (O. Paret 1955). Nach den pollenanalytischen Befunden von P. Groschopf (1955) muß sie aber viel älter sein, da die Ausbreitung der Rotbuche dort erst nach der Aufgabe der Siedlung begann; die C¹⁴-Bestimmung bestätigte das, sie ergab die Daten H 125—107: 5200 ± 200 und H 61—149: 5140 ± 130 vor heute (K. O. Münnich 1957b). Als Alter der Meiendorfer Kulturschicht (Hamburg I) wurden seinerzeit von dem zuständigen Geologen zuerst 20 000, später 18 000 Jahre angenommen; ich hatte es auf Grund des Pollendiagramms auf höchstens 16 000 Jahre geschätzt; 1955 ergab die C¹⁴-Datierung in Washington das Datum W-172: $15\,750 \pm 800$ vor heute mit Kalkgyttja, also möglicherweise ein noch zu hohes Alter (Science 121, 1955, S. 487). Wie Versuche in England (H. Godwin und Mitarb. 1957) und Schweden (H. Östlund und Mitarb. 1956) ergeben haben, ist es möglich, Pollendiagramme durch die C¹⁴-Datierung der wichtigsten Leithorizonte im absoluten Zeitmaß zu eichen, weil die Reihenfolge der C¹⁴-Daten eines Moorprofils im Einklang mit der Schichtenfolge steht. V. Milošević (1957) kennt offenbar nicht die Möglichkeiten der Pollenanalyse.

Eine archäologische Kontrolle wäre natürlich nur dann einwandfrei, wenn die frühgeschichtlichen Daten der mit C¹⁴ zu datierenden Objekte wirklich genau wären; das ist aber für die dazu benutzten altägyptischen Daten höchstens ganz ausnahmsweise der Fall. Einigermaßen sicher werden die frühhistorischen Daten in Mitteleuropa erst von der Römerzeit an; ebenso kommen erst recht frühe historische Daten für die Kontrolle in Betracht. Beide Arten von Daten sind doch mehr, als V. Milošević (1957) meint, dafür benutzt worden. In Heidelberg wurden folgende C¹⁴-Daten von Proben bekannten Alters gemessen (K. O. Münnich 1957b):

- H 54—44/54: Dom zu Aachen: Eichenplanken aus einer mutmaßlich römischen Wasserleitung in 2,20 m Tiefe unter dem Klosterhof: 2060 ± 90 vor heute
- H 59—57: Mainz: Balken einer römischen Rheinbrücke aus dem 1. Jh. n. Chr.: 2010 ± 60 vor heute
- H 169—210: Heidelberg-Neuenheim: Werderstr. 7: Holzkohle aus einer Eisenschlackenschicht im unteren Teil eines römischen Kellers aus der Zeit um 70 bis 80 n. Chr.: 1930 ± 80 vor heute
- H 166—158: Heidelberg-Neuenheim, Jahnstr. 2: Holzkohle aus römischer Abfallgrube aus der Zeit um 100 n. Chr.: 1915 ± 65 vor heute
- H 93—73: Heidelberg-Neuenheim, Ladenburger Straße 93: Holzkohle aus Grube C aus der Zeit Trajans, 100 bis 110 n. Chr.: 1905 ± 65 vor heute
- H 87—76: Hühbeck, Niedersachsen: Holzkohle vom Boden eines Burggrabens aus karolingischer Zeit: 1070 ± 80 vor heute
- St-118 und 132: Wasserburg (bulverket) im Tingstäde träsk auf Gotland, einziges archäologisch datierbares Artefakt eine Fibel aus der Zeit um 1000 n. Chr.; das Mittel von zwei C¹⁴-Bestimmungen ergab nach G. Östlund und Mitarb. 1956 ein Alter von 870 ± 55 Jahren.

Für das Holz eines römischen Schiffes aus dem Nemi-See, Zeitstellung 37—41 n. Chr., wurde in Rom (Science 121, 1955, S. 409 f.) mit der C¹⁴-Methode die Zeitstellung 2030 ± 200 Jahre vor heute (= 80 v. Chr. ± 200), in Cambridge (H. Godwin und Mitarb. 1957, S. 363) das C¹⁴-Datum 53 ± 95 n. Chr. gemessen. Für Holzkohle aus einem etruskischen Grabe bei Cerveteri aus der Zeit um 2600 vor heute ist in Rom (l. c.) ein Alter von 2730 ± 240 Jahren ermittelt worden.

Ferner können dendrochronologische Datierungen C¹⁴-Daten kontrollieren:

- C-159: Sequoia-Holzprobe aus dem innersten Teil des Stammes, dendrochronologisch ermitteltes Durchschnittsalter 2928 ± 51 Jahre; Mittel von 3 Messungen mit festem C (Science 113, 1951, S. 120): 2710 ± 130 vor heute
- H 63—36: Kassel: äußere Jahresringe eines Eichenbalkens der Bräderkirche, vom Forstbotanischen Institut in München dendrochronologisch datiert, von 1392 n. Chr., nach K. O. Münnich (1957b) C¹⁴-Alter 508 ± 85 (= 1442 ± 85 n. Chr.).

Für die Zuverlässigkeit der C¹⁴-Methode spricht auch die Tatsache, daß zahlreiche Proben aus der gleichen Schicht (mit Berücksichtigung des mittleren Fehlers) gut übereinstimmende C¹⁴-Daten liefern und daß in Profilen, die mit dieser Methode durch-

datiert wurden, die Reihenfolge der C¹⁴-Daten der Abfolge der Schichten entspricht, aus denen die datierten Proben entnommen waren. Beweise dafür sind in vielen Datenlisten zu finden, für Moorprofile z. B. bei H. Godwin und Mitarb. (1957), G. Östlund und Mitarb. (1956), E. C. Anderson und Mitarb. (1953), G. W. Barendsen und Mitarb. (1957, S. 913), Hl. de Vries und Mitarb. (1958, S. 123, 133); für archäologische Schichtenfolgen bei W. S. Broecker und Mitarb. (1956 und 1957: Nazca in Peru), H. E. Suess (1954: Haula Fteah-Höhle in der Cyrenaika), E. Ralph (1955 für die Belt- und Hotu-Höhle in Iran) und für zahlreiche Tiefsee-Bohrkerne (z. B. W. S. Broecker und Mitarb. 1956, 1957, J. L. Kulp und Mitarb. 1951, 1952, M. Rubin und H. E. Suess 1955, 1956).

Versager kommen bei der C¹⁴-Datierung auch heute noch vereinzelt vor; sie sind in den allermeisten Fällen darauf zurückzuführen, daß die Probenentnahme oder die Proben nicht einwandfrei waren und nicht mit Salzsäure und Natronlauge vorbehandelt waren (vgl. S. 31) oder ihr C-Gehalt zu klein war, die Probenmenge also nicht ausreichte. Das gilt besonders für Proben aus sehr alten Schichten, deren primärer C¹⁴-Gehalt ja minimal sein muß, daher schon durch winzige Mengen infiltrierter jüngerer C-haltiger Stoffe so verändert werden kann, daß völlig unbrauchbare oder mindestens sehr ungenaue C¹⁴-Daten gemessen werden. Die Gefahr der Infiltration jüngerer Humusstoffe aus dem A-Horizont des Bodens in die Probenschicht ist natürlich in humiden Klimagebieten besonders groß, so daß Ch. B. Hunt (1955) die überwiegende (wenn nicht gesamte) Zahl der C¹⁴-Daten aus dem humiden Gebiet der Großen Seen und des Nordostens der USA für viel zu jung hält. Durch einen eingehenden Vergleich mit wenigstens annähernd gleichalterigen mit der C¹⁴-Methode datierten Bildungen im arideren Westen der USA hat J. B. Griffin (1957) diese Ansicht widerlegt.

Ausnahmsweise zu ungenaue oder gar falsche C¹⁴-Daten wird man sicher erkennen können, wenn man archäologisch oder geologisch völlig oder annähernd gleichaltrige fossilführende Bildungen des Spätquartärs an möglichst vielen Orten mit der C¹⁴-Methode datieren läßt und diese Daten miteinander vergleicht. Wäre die C¹⁴-Methode so fragwürdig, wie V. Milošević (1957) mit nicht wenigen anderen Prähistorikern und manchen Quartärgeologen annimmt, dann wäre es unverständlich, daß so viele Länder so teure C¹⁴-Laboratorien eingerichtet haben und daß namhafte Prähistoriker (z. B. R. J. Braidwood 1958, H. Schwabedissen 1957 und 1958, R. Pittioni 1957) und Quartärgeologen (z. B. P. Woldstedt 1958) ausgiebig von C¹⁴-Daten Gebrauch machen. Auf dem V. Internationalen Prähistoriker-Kongress in Hamburg 1958 wurden in der Sektion Ib (naturwissenschaftliche Nachbargebiete) 27 Vorträge gehalten, davon über die Anwendung der C¹⁴-Methode 14, in anderen Sektionen weitere 6.

V. Milošević (1957) hätte seine Kritik der Anwendbarkeit naturwissenschaftlicher Zeitbestimmungsmethoden in der Vorgeschichte, speziell durch die C¹⁴-Bestimmung, schwerlich veröffentlicht, wenn er als reiner Geisteswissenschaftler sein Manuskript den zuständigen naturwissenschaftlichen Spezialisten zur Prüfung vorgelegt hätte. Wie laienhaft seine Kenntnisse der Grundlagen und der Möglichkeiten der C¹⁴-Methode sind, hat der C¹⁴-Physiker K. O. Münnich (1958) gezeigt, dessen Ausführungen und briefliche Auskünfte ich für die Zurückweisung der Beanstandungen seitens V. Milošević

hier benutze. Bei diesen ist zu beachten, daß sie sich mit zwei Ausnahmen (Egolzwil 3) nur auf mit festem C ermittelte C^{14} -Daten größtenteils älterer Messungen (bis 1955) beziehen, deren statistische Unsicherheit damals, als die Meßmethode noch in der Entwicklung stand, zwei- bis dreimal größer war als heute (K. O. Münnich 1958). Nach V. Milojević (1957) steht und fällt die C^{14} -Methode mit sechs Annahmen:

1. Konstanz der Intensität der kosmischen Strahlung in den letzten 30 000 (heute muß man sagen: 70 000) Jahren;
2. Konstanz der Bildung von C^{14} in der Atmosphäre durch die Neutronen der kosmischen Strahlung;
3. Konstanz einer stabilen und gleichmäßigen Konzentration des C^{14} in der Atmo- und Biosphäre;
4. Konstanz des Kohlenstoffgehalts in seiner isotopen Zusammensetzung;
5. Unabhängigkeit des Gehalts und Zerfalls des C^{14} von äußeren Einwirkungen;
6. Richtigkeit der Halbwertszeit.

Nr. 1 und 2 sind in Nr. 3 enthalten. Die Annahme 5 ist eine Grundtatsache der Kernphysik, ihre Richtigkeit ist bereits seit Jahrzehnten durch viele Experimente bewiesen (K. O. Münnich 1958); der radioaktive Zerfall ist ein akusaler Vorgang! Abweichungen von der Annahme 4 können nur sehr kleine Störungen ergeben, die durch die üblichen Kontrollmessungen von C^{13} korrigiert werden können (K. O. Münnich 1958). Von einiger Bedeutung können also nur Abweichungen von den Grundannahmen 3 und 6 sein.

Die Beurteilung der Bedeutung solcher Abweichungen setzt die Kenntnis der Meßtechnik voraus. Der Leiter des Heidelberger C^{14} -Laboratoriums, Herr Dr. K. O. Münnich, war so freundlich, mir hierzu einige briefliche Auskünfte zu erteilen (21. 7. 1958). Als spezifische Radioaktivität rezenter organogener Substanz fand W. F. Libby mit Hilfe von festem C: für Klärwerk-Methan 1947: 10,5 cpm/g, für Holz 1949 den Mittelwert 12,5 cpm/g, 1951: 15,3 cpm/g. „Die erste Messung an Methan diente nur dazu, einen rohen Überblick zu gewinnen, sie war bestimmt sehr ungenau. Über die zweite Messung von 1949 weiß ich im Augenblick nichts Stichhaltiges zu sagen, sie ist jedenfalls von Libby auch verlassen worden, und sein gültiger Wert ist 15,3 Zerfälle pro g C/min. Dieser Wert ist allerdings nicht unbestritten. Andere Werte sind z. B.: Hayes et al. 1953: $12,9 \pm 0,2$; Arnold 1954: 15,2; Fergusson 1955: $12,5 \pm 0,2$; Hayes et al. 1955: $13,7 \pm 0,2$; Suess 1955: $14,7 \pm 0,4$; Münnich 1957: $13,55 \pm 0,12$. Die Diskrepanzen kommen daher, daß es nicht ganz einfach ist, die absolute Empfindlichkeit eines Zählrohrs oder auch eines anderen Nachweisgerätes zu bestimmen. Im allgemeinen lösen nämlich nicht alle Zerfälle des C^{14} auch wirklich Zählstöße aus. In ein und derselben Apparatur ist der Bruchteil, der wirklich gezählt wird, jedoch eine *K o n s t a n t e*, z. B. 90 % aller Atome, die in dem eingefüllten C^{14} -haltigen Gas zerfallen, werden registriert. Da für die Altersbestimmung nur das Verhältnis zweier Aktivitäten (der zu datierenden Probe und der Rezent-Zählrate des gleichen Zählrohrs) zu bestimmen ist, spielt die Schwierigkeit, daß man nicht sicher weiß, ob z. B. 90 % oder 95 % der Zer-

fälle gezählt werden, selbstverständlich keine Rolle, wohl aber für die Angabe, wie viele C¹⁴-Atome pro g C/min zerfallen. Die Schwierigkeit dieser Messung liegt also nicht in einer Störung durch den Null-Effekt“ (K. O. Münnich). W. F. Libbys Rezent-Zählraten 12,5 und 15,3 cpm/g sind also Konstanten verschiedener Apparaturen; mit beiden Rezent-Zählraten konnten mit diesen Apparaturen also (innerhalb des „mittleren Fehlers“) genügend übereinstimmende C¹⁴-Daten ermittelt werden; die beiden Rezent-Zählraten (die eine Differenz von 1400 Jahren bedeuten) gelten also nicht für die lebende organogene Substanz und jedes Zählrohr, wie V. Miložić (1957, S. 106, 107) meint, sie bedeuten nicht Schwankungen der Radioaktivität, also des C¹⁴-Gehalts lebender Pflanzen.

„Für die Bestimmung der Halbwertszeit gilt Ähnliches wie im Falle der Messung der Rezent-Zählrate. Die Prozedur geht so vor sich, daß man von einer sehr stark aktiven künstlichen C¹⁴-Probe mit einem Massenspektrometer die Zahl der darin enthaltenen C¹⁴-Atome bestimmt und dann von derselben Probe die absolute spezifische Aktivität mißt. Die Halbwertszeit ergibt sich dann aus dem Gesetz des radioaktiven Zerfalls:

$$\frac{\text{Halbwertszeit}}{\text{nat. log 2}} = \frac{\text{Zahl der C}^{14}\text{-Atome in der Probe}}{\text{absolute spezifische Aktivität der Probe}}$$

Die Aktivität der C¹⁴-Probe muß auch hier wieder absolut bestimmt werden. Das ist allerdings bedeutend leichter als im Falle 1 (Messung der Rezent-Zählrate), weil die zur Verfügung stehende Aktivität sehr hoch ist. In das Meßergebnis für die Halbwertszeit gehen jedenfalls Korrekturen ein, die etwas mühsam zu bestimmen sind. Die Messung der C¹⁴-Halbwertszeit wurde seinerzeit von 3 verschiedenen Laboratorien mit großem Aufwand bestimmt! Die Ergebnisse stimmen gut überein, vgl. W. F. Libby (1955, S. 42, 2. Abschnitt): 'The agreement between our determination and those of Jones and Miller et al. is gratifying and leads us to believe that the weighted mean of these three determinations, 5568 ± 30, is probably correct.' Daß die wirkliche Halbwertszeit mehr als 100 Jahre vom Libbyschen Wert abweicht, ist vielleicht nicht mit völliger Sicherheit auszuschließen. Eine solche Abweichung wäre deshalb nicht zu tragisch, weil sie nur eine geringfügige Veränderung des C¹⁴-Zeitmaßstabes bedeuten würde“ (K. O. Münnich). Nach K. O. Münnich (1958) kann die Abweichung vom wahren Zeitmaßstab hier mit Sicherheit nicht größer sein als 10 %, sehr wahrscheinlich ist sie bedeutend geringer. Dafür spricht die Tatsache (auf die W. F. Libby 1955 mit Recht hingewiesen hat), daß sich die mit ihr ermittelten Daten gut mit historischen Daten decken; warum das nach V. Miložić ein *circulus vitiosus* sein soll, ist mir unverständlich. Wenn W. F. Libby (1955) die Halbwertszeit 5568 ± 30 Jahre sehr vorsichtig 'probably accurate to within 50 years and almost certainly to within 100 years' nennt, so bedeutet das doch nicht, daß bereits der Grundwert innerhalb von zwei Jahrhunderten schwankt, wie V. Miložić (1958, S. 105) behauptet! Es wäre allerdings wünschenswert, daß zur Kontrolle der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der C¹⁴-Methode noch mehr historisch zuverlässig datiertes Material mit dieser Methode datiert wird; frühhistorisches ist mei-

stens ungeeignet, da man nicht weiß, wie es mit der Genauigkeit der frühhistorischen Daten bestellt ist. „C¹⁴-Datierungen von Proben vorzunehmen, die jünger als 500 Jahre sind, ist im Hinblick auf den mittleren Fehler (der im allgemeinen ± 100 Jahre beträgt) nicht sehr sinnvoll, da die Anforderungen an die Genauigkeit mit geringerem Alter stark zunehmen“ (K. O. Münnich). Es sind allerdings vereinzelt noch jüngere C¹⁴-Daten als 500 Jahre vor heute in der neuesten Literatur veröffentlicht, z. B. Y-347: 460 ± 40 (Science 126, 1957, S. 909), L-262: 420 ± 80 (Science 126, 1957, S. 1329), Gro-450: 355 ± 90 (Science 127, 1958, S. 136).

Die Tatsache, daß 46 mit modernen Apparaturen ermittelte C¹⁴-Daten von verschiedenen Schichten aus dem rund 1000jährigen Alleröd-Interstadial in den pollenanalytisch und warwengeochronologisch zeitlich genau festgelegten Spätglazialabschnitt fallen, spricht nicht nur dafür, daß die Genauigkeit der Halbwertszeit durchaus befriedigend ist, sondern auch dafür, daß diese C¹⁴-Daten vom wahren Wert höchstens nur ein wenig abweichen.

Die dritte Grundannahme von V. Milojčić verlangt eine doppelte Prüfung: a) Ist die Konzentration des C¹⁴ in der Atmosphäre, im Pflanzen- und Tierreich stabil und gleichmäßig? b) War sie es auch in den letzten 70 000 Jahren?

Zu a): H. E. Suess (1956) hat 1953 nachgewiesen, daß in den letzten sechzig Jahren die Konzentration des C¹⁴ in der Atmosphäre durch Verdünnung des radioaktiven Kohlendioxyds mit inaktivem durch die Verbrennung ungeheurer Mengen von Brennstoffen (vor allem in der Industrie) mit inaktivem („totem“) Kohlenstoff um ca. 1,5 % (Hl. de Vries 1958a) verdünnt ist; daher sind die vor 1953 gemessenen Daten ein wenig zu alt. Daher haben die C¹⁴-Laboratorien in den letzten Jahren zur Messung des Rezent-Standards ihrer Zählrohre Holz aus dem vorigen Jahrhundert benutzt. Inzwischen wird durch die zahlreichen Atombomben-Versuche die C¹⁴-Konzentration der Atmosphäre ständig erhöht (K. O. Münnich und J. C. Vogel 1958, Hl. de Vries 1958c).

Rezente kalziumkarbonathaltige organogene Substanzen (Knochen, Geweihe, Molluskenschalen) haben eine andere spezifische Radioaktivität als (in der Trockensubstanz) fast rein organische pflanzliche Stoffe wie Holz, und zwar hat Karbonat im Meere danach ein scheinbares Alter von ca. 400 Jahren (H. E. Suess 1956, S. 543), so daß rezente Molluskenschalen, auf die spezifische Radioaktivität von Holz bezogen, ein scheinbares Alter von 2000—3000 Jahren haben können. Zur Datierung von gehobenen Stränden mit Hilfe subfossiler oder fossiler Molluskenschalen benutzt man daher den Rezent-Standard von rezenten Molluskenschalen des angrenzenden Meeres. Bei Knochen und Geweih, die in hartem Grundwasser gelegen haben, das mehr C¹⁴ enthält, als es theoretisch enthalten sollte (K. O. Münnich 1957a), wird der C¹⁴-Gehalt durch Isotopen-Austausch erhöht, das Alter also vermindert. Untergetauchte Wasserpflanzen, die Kohlendioxyd zur Assimilation auch dem Kalziumhydrokarbonat des Wassers entnehmen, sind ärmer an C¹⁴ als gleichaltrige Land- und Sumpfpflanzen, die ihr CO₂ nur aus der Atmosphäre entnehmen; jene erscheinen daher auf Grund der C¹⁴-Messung älter als sie wirklich sind (E. S. Deevey, Jr., und Mitarb. 1954), was auch \pm von Kalkgyttja auch nach Beseitigung des Karbonats mit Salzsäure gilt.

Ob die „absolute“ spezifische Radioaktivität (die aber nach den obigen Ausführungen von K. O. Münnich nicht genau sein kann) bei der Messung durch W. F. Libby in demselben Zählrohr bei lebenden Pflanzen von 14,47 bis 16,31 und bei Muscheln sogar von 13,3 bis 17,4 cpm/g variiert, ist aus den Tabellen von W. F. Libby (1955, S. 15, Tab. 2 und 3) nicht zu ersehen; möglicherweise sind die Extreme 14,47 (rezente afrikanische Wildrose) und 16,31 (australischer Eucalyptus) Meßfehler. Mit Gaszählrohren in neuerer Zeit ausgeführte Messungen der spezifischen Radioaktivität haben bei Pflanzen eine Variation ergeben, die 3% (dem entspricht eine Altersvariation um 240 Jahre) nicht übersteigt (Hl. de Vries 1958b). K. O. Münnich (1957b) fand, daß die spezifische Radioaktivität von gleichaltem (1840—1850) Eichen- und Fichtenholz in Westdeutschland vom Heidelberger Rezentstandard um $-0,90 \pm 0,27$ % bzw. $+0,43 \pm 0,25$ % im Durchschnitt abweicht, Differenz 1,33 % entsprechend einem (scheinbaren) Altersunterschied von ca. 100 Jahren (wenn man vom \pm mittleren Fehler absieht). Hl. de Vries (1958b) hat den Groninger Rezentstandard mit Hülsen der Erdnuß (*Arachis hypogaea*) von 1954 bestimmt; er liegt 3 % unter der spezifischen Radioaktivität von zwei deutschen Waldbäumen, so daß alle bisher von Groningen veröffentlichten Daten ca. 240 Jahre zu niedrig sind. Verkohlter Weizen aus dem Jahre 1684 n. Chr. hatte eine 4 % höhere spezifische Radioaktivität als die Erdnußhülsen. Hl. de Vries hat auch eine geringe, noch nicht erklärbare regionale Variation der spezifischen Radioaktivität gefunden.

Zu b): Hl. de Vries (1958b) hat ferner geringe Schwankungen der spezifischen Radioaktivität um ca. 1 % (entsprechend ca. 80 C¹⁴-Jahren) seit 1500 n. Chr. festgestellt und mit Kälteperioden zu erklären versucht. Ob diese Variationen in noch früheren Zeiten auch vorkamen und womöglich noch größere Ausmaße hatten, wissen wir noch nicht; wahrscheinlich ist das im Hinblick auf die (innerhalb der Fehlergrenze) mit sicheren historischen Daten gut übereinstimmenden C¹⁴-Daten nicht, auch spricht dagegen die Tatsache, daß 46 Alleröd-Daten zahlreicher Fundstellen durch die Warwengeochronologie gestützt werden. Aus diesem Grunde darf man auch annehmen, daß der spezifische Rezentstandard sich in den letzten 12 000 Jahren nicht merklich verändert hat; für ältere Zeiten fehlt vorläufig noch eine Kontrollmöglichkeit. —

Die von V. Milošević (1957) erwähnten Unstimmigkeiten und Ungereimtheiten betreffen (mit zwei Ausnahmen) ältere Daten mit größeren statistischen Fehlern, die der C¹⁴-Datierung mit festem C anhaften. Die meisten Diskrepanzen sind, wie der mit \pm angehängte „mittlere Fehler“ erkennen läßt, nur scheinbar (K. O. Münnich 1958), andere sind auf zu kleine Proben, andere auf fehlende Vorbehandlung (die damals noch nicht üblich war) zurückzuführen. Im einzelnen ist zu den Beanstandungen von V. Milošević (1957, S. 107—109) folgendes zu sagen:

1. E g o l z w i l 3: In Kopenhagen (H. Levi und H. Tauber 1955, S. 114) ist die zuverlässigste Datierung (mit festem C!) der Kulturschicht mit der „ganz in einer 10 cm dicken Kulturschicht verkapselt gewesenen“ Holzkohle K-121 ausgeführt, sie ergab als Mittelwert von zwei Messungen (4920 ± 180 und 4520 ± 180) das C¹⁴-Datum 4720 ± 130 Jahre. Das Weißtannenholz K-115 lag waagrecht „völlig in der Kulturschicht

verkapselt“ und hatte als Mittel von drei Messungen (mit festem C, daher leider mit relativ großer statistischer Unsicherheit) die Zeitstellung 4500 ± 150 vor heute; die „Altersdifferenz“ von 220 Jahren ist aber nur scheinbar, weil durch den „mittleren Fehler“ vorgetäuscht, da die eine der drei Messungen 4940 ± 300 , eine andere 4540 ± 210 ergeben hatte! Das Eschenholz K-116 lag waagrecht in einer hier kaum 1 cm dicken Kulturschicht, „so daß das Holz unmittelbar auf Seekalk lag und davon bedeckt war“; da keine Vorbehandlung mit Salzsäure erwähnt wird, könnte das scheinbar etwas zu hohe Alter 5080 ± 280 (nur eine Messung!) außer auf den „mittleren Fehler“ auch auf Kalkgehalt zurückzuführen sein. In London (F. E. Zeuner 1955) sind Pfähle (? senkrechtstehende Hölzer) mit Azetylen datiert worden. Für den Eschenpfahl GL-18 wurde das C^{14} -Datum 4650 ± 110 in guter Übereinstimmung mit dem Datum K-121 ermittelt. Der Eichenholzpfahl GL-17, dessen C^{14} -Datum 4000 ± 110 F. E. Zeuner zu Unrecht auf Grund der pollenanalytischen Datierung für brauchbar hält, soll vom stratigraphischen und archäologischen Gesichtspunkt ebenso alt sein wie der Eschenpfahl; F. E. Zeuner rechnet aber mit der Möglichkeit, daß gewisse Bauteile des Pfahlbaues einen Altersunterschied von ca. 500 Jahren haben könnten (viel wahrscheinlicher liegt hier aber eine zu große Ungenauigkeit der Messung vor).

2. Maglemose-Siedlung Kildegaard im Aamose (Fr. Johnson 1951, S. 12, 56 u. 57), C-433, 434 und 435 von W. F. Libby mit festem C ohne Vorbehandlung (mit NaOH) datiert. Die Daten sind alle (auch für die Holzkohle C-434) \pm zu alt, sehr wahrscheinlich, weil die Proben in die darunterliegende, also ältere Gyttja schon von den Maglemose-Leuten hineingetreten und ohne Vorbehandlung gemessen waren; dazu kommt das große statistische Streumaß (± 440 bis ± 830).

3. Die Belt-Höhle (Fr. Johnson 1951, S. 14): für die mit festem C ermittelten unmöglichen C^{14} -Daten wurde schon 1951 ausdrücklich angegeben: 'Large errors in the Belt Cave samples are attributed to small size.' Inzwischen sind mit neuen Proben brauchbare Daten von E. Ralph (1955) veröffentlicht worden.

4. Höhle von St. Marcel, La Garenne, Indre (Fr. Johnson 1951, S. 17): die mit festem C gemessenen zweifellos unbrauchbaren C^{14} -Daten stammen höchst wahrscheinlich von nicht einwandfreien Proben, die in Höhlen aus erklärlichen Gründen offenbar nur selten zu finden sind; außerdem ist keine Vorbehandlung zur Kalkbeseitigung vorgenommen worden.

Das besonders in den ersten Jahren der Anwendung relativ große Streumaß (\pm mittlerer Fehler) der mit festem C nach der Methode von W. F. Libby zunächst zur Erprobung und Orientierung ermittelten C^{14} -Daten ist für die Erforschung der Jungsteinzeit und der vor- und frühhistorischen Metallzeiten allerdings ein Übelstand, wenn diese Daten auch besser sind als sehr viele (wenn nicht die meisten) mit archäologischen Methoden ausgeführte Zeitbestimmungen. Man darf aber nicht in Bausch und Bogen alle mit diesem Verfahren ermittelten vorgeschichtlichen C^{14} -Daten als unbrauchbar ablehnen, denn viele sind mit verbesserten Methoden innerhalb des damit erheblich verkleinerten mittleren Fehlers als richtig bestätigt, andere genauer gemacht worden. Diese neueren C^{14} -Daten sind, wenn die Proben und die Probenentnahme einwand-

frei waren, als zuverlässiger den bisherigen quartärgeologischen und mit archäologischen Methoden gefundenen prähistorischen Daten im Falle einer Diskrepanz vorzuziehen. Die C¹⁴-Daten können aus physikalischen Gründen keine Daten in streng-historischem Sinn sein und wollen es auch nicht sein, aber die von den Prähistorikern mit archäologischen Methoden ermittelten Zeitbestimmungen sind auch keine Daten in streng-historischem Sinn. Kann denn die Vorgeschichte Daten in „streng-historischem Sinn“ haben? Schon deswegen war der Angriff von V. Miložić (1957) auf die C¹⁴-Methode unangebracht. Wenn Prähistoriker mit den naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden nicht zufrieden sind, mögen sie selbst bessere erfinden.

Wann sind Proben für die C¹⁴-Datierung einwandfrei?

1. Wenn sie aus nicht durchwurzeltten Schichten entnommen und wenn sie ohne Berührung mit kohlenstoffhaltigen Substanzen wie Papier, Holzwolle, Humus, Konservierungsmitteln u. dgl. in Perlon-Beutel gepackt sind;
2. wenn Holzkohle, Holz und andere pflanzliche Stoffe bevorzugt und unverkohlte Knochen, Zähne und Geweihe unter dem Grundwasserspiegel nicht genommen werden, weil in der Regel ungeeignet;
3. wenn die Proben möglichst beträchtlich größer genommen werden als die üblichen Mindestmengen, damit ihre Vorbehandlung im C¹⁴-Labor möglich ist, wofür Holzkohle und Holz am besten geeignet sind;
4. wenn in die Fundschicht der Probe nicht durch Sickerwasser oder auf anderem Wege jüngere Humusstoffe infiltriert sind, die aber in der Regel durch die genannte Vorbehandlung vor der Messung beseitigt werden können; das ist besonders bei mutmaßlich sehr alten Proben von ca. 25 000 bis 70 000 Jahren vor heute zu beachten;
5. wenn die Fundschicht der Proben ungestört war;
6. wenn die Proben aus der richtigen geologisch bzw. archäologisch relativ datierten Schicht entnommen sind.

In allen Fällen ist mit jeder Probe eine Zeichnung des Fundprofils mit eingetragener Fundschicht der Probe, Angabe der Mächtigkeit und petrologischen Beschaffenheit der Schichten (vor allem des Hangenden) und des Oberbodens einzusenden, damit der C¹⁴-Physiker beurteilen kann, ob eine Verunreinigung durch Infiltration jüngerer Humusstoffe in die Fundschicht auszuschließen ist; ebenso sind Angaben über den Grundwasserstand an der Fundstelle erwünscht.

Schrifttum

- Anderson, E. C., Levi, Hilde, and Tauber, H. (1953): Copenhagen natural radiocarbon measurements I. — *Science* 118, 6—9.
- Barendsen, G. W., Deevey, E. S., Gralenski, L. J. (1957): Yale natural radiocarbon measurements III. — *Science* 126, 908—919.
- Blanc, A. C. (1958): Il V Congresso Internazionale delle Scienze Preistoriche e Protostoriche Amburgo, 24—30 Agosto 1958. — *Quaternaria* V, Roma, 3.

- Blanc, A. C., de Vries, Hl., and Follieri, M. (1957): A first C¹⁴-date for the Würm I chronology on the Italian coast. — *Quaternaria* IV, 1—11.
- Braidwood, R. J. (1958): Near Eastern Prehistory. — *Science* 127, 1419—1430, und Vortrag auf dem V. Internat. Prähistor.-Kongreß in Hamburg 1958: Radioactive Carbon Chronology and its Implications in Understanding the Appearance of the Effective Village-Farming communities in Southwestern Asia.
- Broecker, W. S., Kulp, J. L., Tucek, C. S. (1956): Lamont natural radiocarbon measurements III. — *Science* 124, 154—165.
- Broecker, W. S., and Kulp, J. L. (1957): Lamont natural radiocarbon measurements IV. — *Science* 126, 1324—1334.
- De Geer, E. H. (1951): De Geer's chronology confirmed by radioactive carbon, C¹⁴. — *Geol. Fören. i Stockholm Förhandl.* 73, 517—518.
- De Geer, G. (1940): *Geochronologia Suecica* Principles. — *Kgl. Svensk. Vet. Akad. Handl.*, Ser. 3, 18 (6).
- Deevey, E. S., Gross, M. S., Hutchinson, G. E., and Kraybill, H. L. (1954): The natural C¹⁴ contents of materials from hard-water lakes. — *Proceed. National Acad. Sci.* 40, 285—288.
- Emiliani, C. (1955): Pleistocene temperatures. — *The Journ. of Geol.* 63 (6), 538—578. — (1956): Note on absolute chronology of human evolution. — *Science* 123, 924—926. — (1958): Paleotemperature analysis of core 280 and Pleistocene correlations. — *The Journ. of Geol.* 66 (3), 264—275.
- Firbas, F. (1949): Spät- und postglaziale Waldgeschichte Mitteleuropas, I. Bd., Jena.
- Fromm, E. (1938): Geochronologisch datierte Pollendiagramme und Diatomeenanalysen aus Angermanland. — *Geol. Fören. i Stockholm Förhandl.* 60, 365—381.
- Godwin, H., Walker, D., and Willis, E. H. (1957): Radiocarbon dating and post-glacial vegetational history: Scaleby Moss. — *Proceed. R. Soc., B*, 147, 352—366.
- Griffin, J. B. (1957): The reliability of radiocarbon dates for Late Glacial and Recent Times in Central and Eastern North America. — *Univ. of Michigan, Museum of Anthropology Paper*, Ann Arbor, 10—34.
- Groschopf, P. (1955): in O. Paret 1955.
- Groß, H. (1957a): Der heutige Stand der naturwissenschaftlichen Datierungsmethodik im Dienste der Vorgeschichtsforschung. — *Jahresschr. f. Mitteldeutsche Vorgeschichte* 41/42, 72—95. — (1957b): Die Fortschritte der Radiokarbon-Methode 1952—1956. — *Eiszeitalter u. Gegenwart* 8, 141—180. — (1958): Die bisherigen Ergebnisse von C¹⁴-Messungen und paläontologischen Untersuchungen für die Gliederung und Chronologie des Jungpleistozäns in Mitteleuropa und den Nachbargebieten. — *Ebenda* 9, 155—187.
- Haring, H., de Vries, A. E., de Vries, Hl. (1958): Radiocarbon dating up to 70 000 years by isotopic enrichment. — *Science* 128, 472—473.
- Hunt, Ch. B., (1955): Radiocarbon dating in the light of stratigraphy and weathering processes. — *The Scientific Monthly* 81, 240—247.
- Iversen, Johs. (1953): Radiocarbon dating of the Alleröd Period. — *Science* 118, 9—11.
- Johnson, Fr. (1951): Radiocarbon dating. — *American Antiquity* 17, Nr. 1, Part 2, 1—65.
- Kulp, J. L. (1952): The carbon-14 method of age determination. — *The Scientific Monthly* 75, 259—267.
- Kulp, J. L., Tryon, L. E., Eckelman, W. R. and Snell, W. A. (1952): Lamont natural radiocarbon measurements II. — *Science* 116, 409—414.
- Levi, H. und Tauber, H. (1955): Datierung der Pfahlbausiedlung Egolzwil 3 mit Hilfe der Kohlenstoff-14-Methode. — In: W. U. Guyan: *Das Pfahlbauproblem*. Monographien zur Ur- und Frühgeschichte der Schweiz, Vol. 11, Basel.

- Libby, W. F. (1954a): Chicago radiocarbon dates IV. — *Science* 119, 135—140. — (1954b): Chicago radiocarbon dates V. — *Science* 120, 733—742. — (1955): *Radiocarbon Dating*. 2nd ed. Chicago.
- Milojić, V. (1949): *Chronologie der Jüngeren Steinzeit Mittel- und Südosteuropas*. — Berlin, 137 S., 39 Taf. u. 2 Beilagen. — (1957): Zur Anwendbarkeit der C¹⁴-Datierung in der Vorgeschichtsforschung. — *Germania* 35, 102—110.
- Müller, H. (1953): Zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte des mitteldeutschen Trockengebiets. — *Nova Acta Leopoldina N. F.* 16, Nr. 110.
- Münnich, K. O. (1957a): Messungen des C¹⁴-Gehalts von hartem Grundwasser. — *Naturwiss.* 44, 32—33. — (1957b) Heidelberg natural radiocarbon measurements I. — *Science* 126, 194—199. — (1957c) in: Overbeck und Mitarb. (1957). — (1958) in: H. Schwabedissen und K. O. Münnich (1958).
- Münnich, K. O. und Vogel, J. C. (1958): Durch Atombombenexplosionen erzeugter Radio-kohlenstoff in der Atmosphäre. — *Naturwiss.* 45, 327—329.
- Östlund, G., Gejvall, N.-G., och Lundqvist, G. (1956): Äldersbestämning med hjälp av kol-14. — *Ymer* 1956, h. 3, 220—236.
- Overbeck, F., Münnich, K. O., Aletsee, L. und Averdick, F. R. (1957): Das Alter des „Grenzhorizonts“ norddeutscher Hochmoore nach Radiocarbon-Datierungen. — *Flora* 145, 37—71.
- Paret, O. (1955): *Das Steinzeitdorf Ehrenstein bei Ulm (Donau)*. Ludwigsburg.
- Pittioni, R. (1954): *Urgeschichte des österreichischen Raumes*. Wien. — (1957): Der Beitrag der Radiokarbon-Methode zur absoluten Datierung urzeitlicher Quellen. — *Forschungen u. Fortschritte* 31, H. 12, 357—364.
- Ralph, E. (1955): University of Pennsylvania radiocarbon dates I. — *Science* 121, 149—151.
- Rubin, M. and Suess, H. E. (1955): U.S. Geological Survey radiocarbon dates, II. — *Science* 121, 481—488. — (1956): desgl., III. — *Science* 123, 442—448.
- Schwabedissen, H. (1957): Das Alter der Federmesser-Zivilisation auf Grund neuer naturwissenschaftlicher Untersuchungen. — *Eiszeitalter und Gegenwart* 8, 200—209. — (1958a): Einige Ergebnisse der C¹⁴-Forschung in archäologischer Beleuchtung. — Vortrag auf dem V. Internat. Prähistoriker-Kongress in Hamburg. — (1958b): siehe folgenden Titel.
- Schwabedissen, H. und Münnich, K. O. (1958): Zur Anwendung der C¹⁴-Datierung und anderer naturwissenschaftlicher Hilfsmittel in der Ur- und Frühgeschichtsforschung. — *Germania* 36, 133—149.
- Schwarzbach, M. (1950): *Das Klima der Vorzeit*. Stuttgart. — (1954): Eine Neuberechnung von Milankovitch's Strahlungskurve. — *N. Jahrb. Geol. Paläontol., Mh.*, 257—260.
- Suess, H. E. (1954): U.S. Geological Survey radiocarbon dates I. — *Science* 120, 5—7. — (1956): Grundlagen und Ergebnisse der Radiokohlenstoff-Datierung. — *Angewandte Chemie* 68, Nr. 17/18, 540—546.
- Tauber, H. (1956): Copenhagen natural radiocarbon measurements II. — *Science* 124, 879 bis 881.
- Troels-Smith, J. (1953): Ertebøllekultur — Bondekultur. — *Aarbøger f. Nord. Oldkyndighed og Historie* 1953, 1—62. — (1956): Neolithic Period in Switzerland and Denmark. — *Science* 124, 876—879.
- Vries, Hl. de (1957): Contribution of radiocarbon dating and measurement of paleotemperatures to Pleistocene correlations. — *Geol. en Mijnbouw* 19, 303, 304. — (1958a): Radiocarbon dates for upper Eem and Würm-interstadial samples. — *Eiszeitalter u. Gegenwart* 9, 10—17. — (1958b): Variation in concentration of radiocarbon with time and location on earth. — *Koninkl. Nederl. Akad. van Wetensch. Proceed. Ser. B*, 61 (2), 1—9. —

- (1958c): Atomic bomb effect: Variation of radiocarbon in plants, shells, and snails in the past 4 years. — *Science* 128, 250, 251.
- Vries, Hl. de and Barendsen, G. W. (1954): Measurements of age by the carbon-14 technique. — *Nature* 174, 1138 f.
- Vries, Hl. de, Barendsen, G. W., Waterbolk, H. T. (1958): Groningen radiocarbon dates II. — *Science* 127, 129—137.
- Woldstedt, P. (1954, 1958): *Das Eiszeitalter*. 2. Auflage, I. u. II. Bd., Stuttgart.
- Zeuner, F. E. (1955): Radiocarbon dates. — University of London Institute of Archaeology 11th Annual Report, 43—50.