

## ZUM RADIOMETRISCHEN ALTER DES HOLSTEIN-INTERGLAZIALS

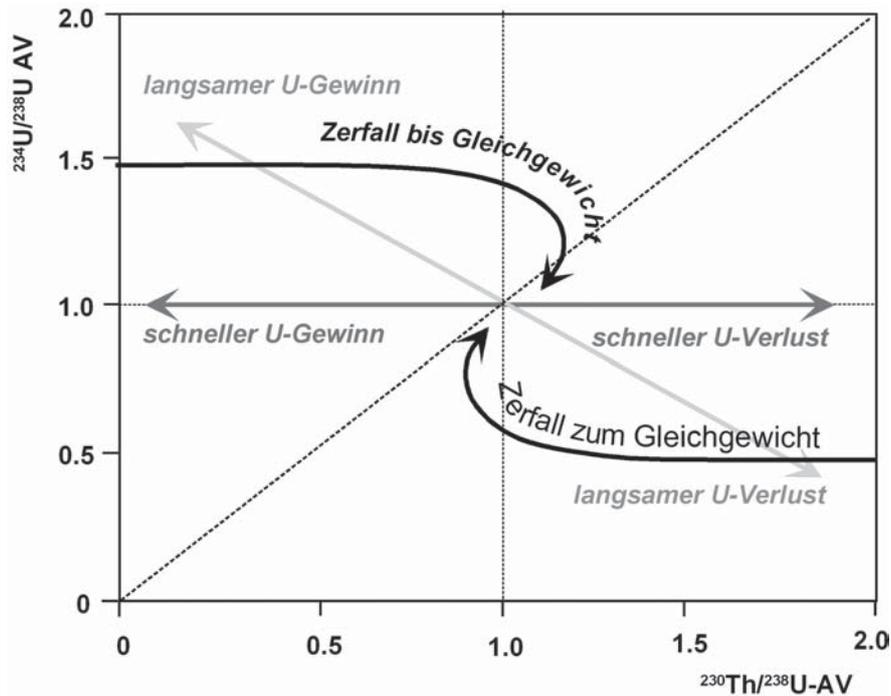
Die Entdeckung Urey's (1950), dass die Isotopenzusammensetzung des Sauerstoffs mariner Kalke ein präzises Paläotemperatursignal enthält, ermöglichte Emiliani (1955), seine weltweit akzeptierten Marine Isotopenstadien einzuführen, in der Glaziale mit geraden Zahlen und Interglaziale mit ungeraden Zahlen durchnummeriert sind. Ein unerwartetes Nebenergebnis dieser Arbeit war, dass es weit mehr als die bis dahin angenommenen vier terrestrischen Glazial-/Interglazialzyklen im Quartär gegeben hat. Shackleton (1969) gelang dann die erste Korrelation mit der Zuordnung des Eem-Interglazials zum MIS 5e. Ein nächster bedeutender Schritt war die Entwicklung der numerischen Chronologie der marinen Isotopenstadien (Shackleton / Opdyke 1973), die später mehrmals präzisiert wurde (z. B. Bassinot u. a. 1994). Das Alter des »Großen Interglazials«, des Holsteins, blieb jedoch bis heute kontrovers diskutiert (z. B. Scourse 2006). Unter Holstein folgen wir der Definition der INQUA-Subcommission on European Quaternary Stratigraphy (SEQS; Litt u. a. 2005).

Multidisziplinäre Analogieschlüsse konzentrierten sich zwar immer häufiger auf MIS 11 für das Holstein-Interglazial, also ein »absolutes« Alter um 410 ka, ließen aber bisher keine endgültige Festlegung zu. Als wesentliche Stütze der Zuordnung zu MIS 11 wird das zusammengesetzte Pollenprofil vom Zentral Massiv in Frankreich (Reille u. a. 2000) angesehen, nach dem das Praclaux-Interglazial zuverlässig mit MIS 11 gleichzusetzen ist. Weniger belastbar (Geyh / Müller 2005) ist der darauf aufbauende Analogieschluss, dass dieses Isotopenstadium auch mit dem Holstein-Interglazial korreliert sein soll. Geyh / Müller (2005) fanden schlüssige und bis heute nicht widerlegte Argumente, dass das Holstein-Interglazial besser dem folgenden Landos-Interglazial (MIS 9) ähnelt. Der Mittelwert aller bestimmten  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter von Torfen aus Bossel (Lkr. Stade) von  $312 \pm 3$  ka (Geyh / Müller 2005) ließ eine sichere Zuordnung zu MIS 9 zu. Mit der ständigen Weiterentwicklung sensibler und nachvollziehbarer Kriterien zur Identifizierung von Datensätzen postsedimentär ungestörter und gestörter Proben (Geyh 2008) wurde dieses Ergebnis gefestigt. Die scheinbare Diskrepanz zur Einordnung des pollenanalytisch gleich alten englischen Hoxnian-Typusprofils Marks Tey (Essex/GB) zum MIS 11 wurde mit der Berechnung von  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Maximalaltern aus den U/Th-Isotopenmesswerten (Geyh / Müller 2005; Geyh 2008) weitgehend ausgeräumt.

### METHODE DER $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -ALTERSBESTIMMUNG

Die Methode, Niedermoortorfe und Lignit mit Hilfe der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methode zu datieren, ist in mehreren Arbeiten ausführlich vorgestellt worden (van der Wyk u. a. 1986; van der Plicht / Heijnis 1989; Heijnis 1992; Heijnis / van der Plicht 1992; Heijnis u. a. 1993; Geyh u. a. 1997; Geyh / Techmer 1997; Rowe u. a. 1997; Geyh 2008). Es brauchen deshalb hier nur die wesentlichen Aspekte wiederholt werden.

Uran, das leicht wasserlöslich ist und deshalb auch im Grundwasser vorkommt, wird aufgrund des hohen Absorptionsvermögens humoser Stoffe für Schwermetalle im wachsenden Niedermoortorf fest gebunden und angereichert. In der Folgezeit wächst durch radioaktiven Zerfall radiogenes  $^{230}\text{Th}$  aus dem Uran-Isotop  $^{234}\text{U}$ . Damit wird das Aktivitätsverhältnis (AV)  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  – physikalisch gesehen – zu einem Chronometer, dessen Anwendung geschlossene Systeme erfordert, in denen postsedimentär Uran und Thorium weder



**Abb. 1**  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Entwicklungsdiagramm des  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Chronometers: Bei einem initialen  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis (AV) über Eins (hier 1,45) und in einem geschlossenen System nimmt das  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -AV durch radioaktiven Zerfall entlang von Entwicklungslinien auf Eins bei unendlichem Alter ab. Im offenen System kann z. B. sauerstoffreiches oder -armes Wasser Uran lösen bzw. ausscheiden. Die Aktivitätsverhältnisse verschieben sich dann nach links bzw. rechts. Verlaufen diese Prozesse langsam, kann es zusätzlich zu einer Isotopenfraktionierung zwischen  $^{234}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$  kommen, so dass sich die Aktivitätsverhältnisse von der Entwicklungslinie nach links oben bzw. rechts unten verschieben. Beide Effekte sind nicht korrigierbar und die diesbezüglichen Messwerte sind deshalb von der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersbestimmung auszuschließen.

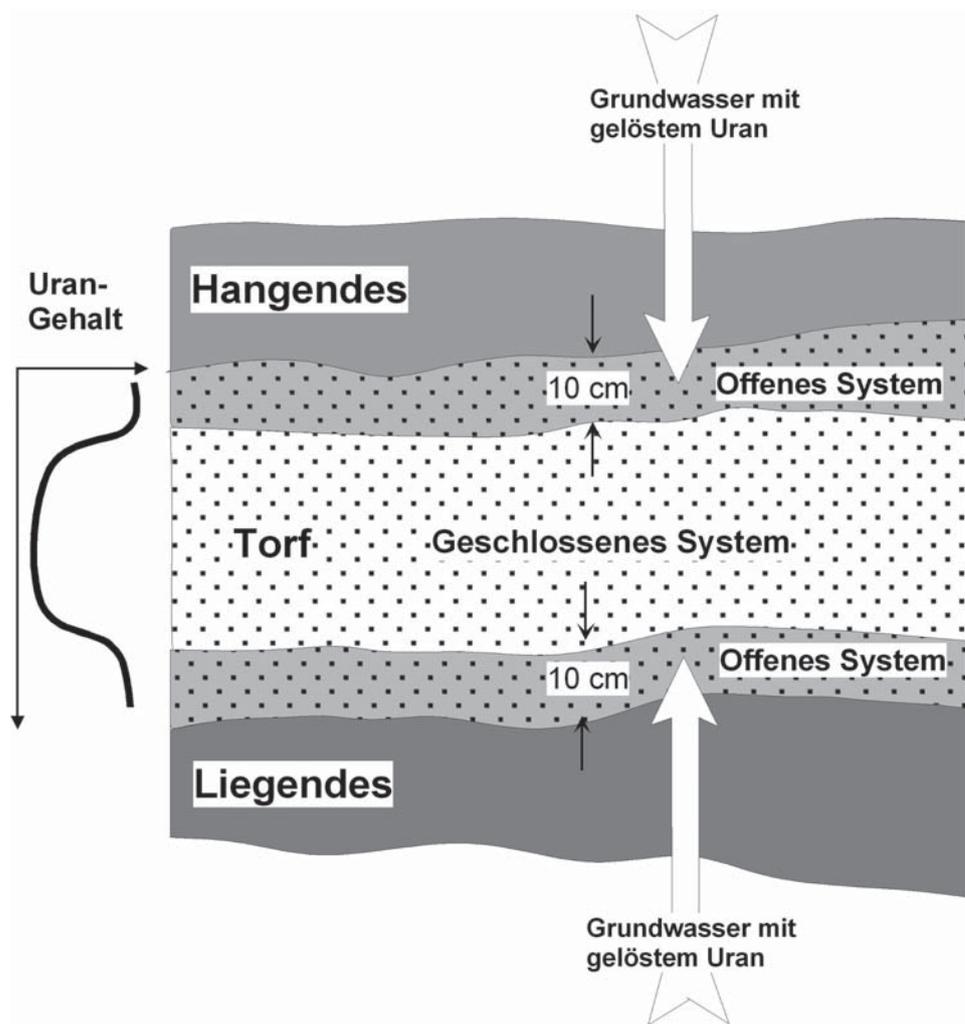
nach außen verloren gegangen noch von außen gewonnen worden sind. In diesem Fall verschieben sich die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - und  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -AV im U/Th-Isotopenentwicklungsdiagramm mit wachsendem Alter entlang von Entwicklungslinien (**Abb. 1**). Letztere beginnen bei dem  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter Null links im Bild und enden bei unendlichem Alter im Punkt (1,1).

Mächtige organische interglaziale Ablagerungen haben sich als geschlossene Systeme für Uran und Thorium erwiesen, auch wenn sie über lange Zeit von einsickerndem Grundwasser durchflossen worden sind. Das in ihm gelöste Uran wird nämlich in den oberen und unteren organischen Randschichten (etwa 10 cm) vollständig und fest gebunden, so dass die Kernschicht unbetroffen und als geschlossenes System für Uran erhalten bleibt (z. B. Heijnis 1992; **Abb. 2**).

## DAS BOSSEL-PROFIL

Im Jahr 1985 wurde in Bossel der Bohrkern GE 1/85 gezogen, um daran hoch aufgelöste Pollenanalysen durchzuführen. Am Restmaterial wurden erste, noch sehr ungenaue radiometrische  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen versucht (**Tab. 1; Abb. 3**, hier Labornummern unter 1000). Der errechnete Mittelwert von  $275 \pm 50$  ka der ermittelten  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter ließ eine eindeutige Einstufung des Holstein-Interglazials weder ins MIS 7 noch MIS 9 zu.

Deshalb wurde ein zweiter Kern GE 00/1 in Bossel gezogen, pollenanalytisch mit dem alten korreliert (Geyh /



**Abb. 2** Schematischer Schnitt durch ein idealisiertes Vorkommen interglazialer organischer Ablagerungen. Die Kernzone ist für die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersbestimmung geeignet, die Randzonen mit laufender Urananreicherung (offenes System) nicht.

Müller 2005), und massenspektrometrisch genauere  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersbestimmungen (Tab. 1; Abb. 3, Labornummern >2000) durchgeführt.

Das Holstein-Typusprofil Bossel enthält zwei organischen Schichten, zwischen die Sand und Schluff eingeschaltet sind. Sie waren in den Bohrkernen so dünn, dass einige Proben für die Datierung nahe der wenig geeigneten Randzonen entnommen werden mussten (Abb. 3). Dadurch wurde es aber möglich, die Effizienz der Methoden zur Auswahl zuverlässiger und unzuverlässiger Messdaten zu beurteilen. Die Mess- und Auswertungsergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Standardabweichung des Mittelwerts der einzelnen  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter ist mit 4 ka um 1 ka etwas größer als die von Geyh / Müller (2005) veröffentlichte, weil durch die Verschärfung der Auswahlkriterien zwei weitere Ergebnisse von der Endauswertung ausgeschlossen werden mussten.

## KORREKTUR- UND AUSWAHLVERFAHREN

Ideale Modellbedingungen zur Anwendung der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methode sind in der Natur selten erfüllt. Es gibt mehrere genetische, geochemische und physikalische Prozesse, die die radiometrische Altersbestimmung

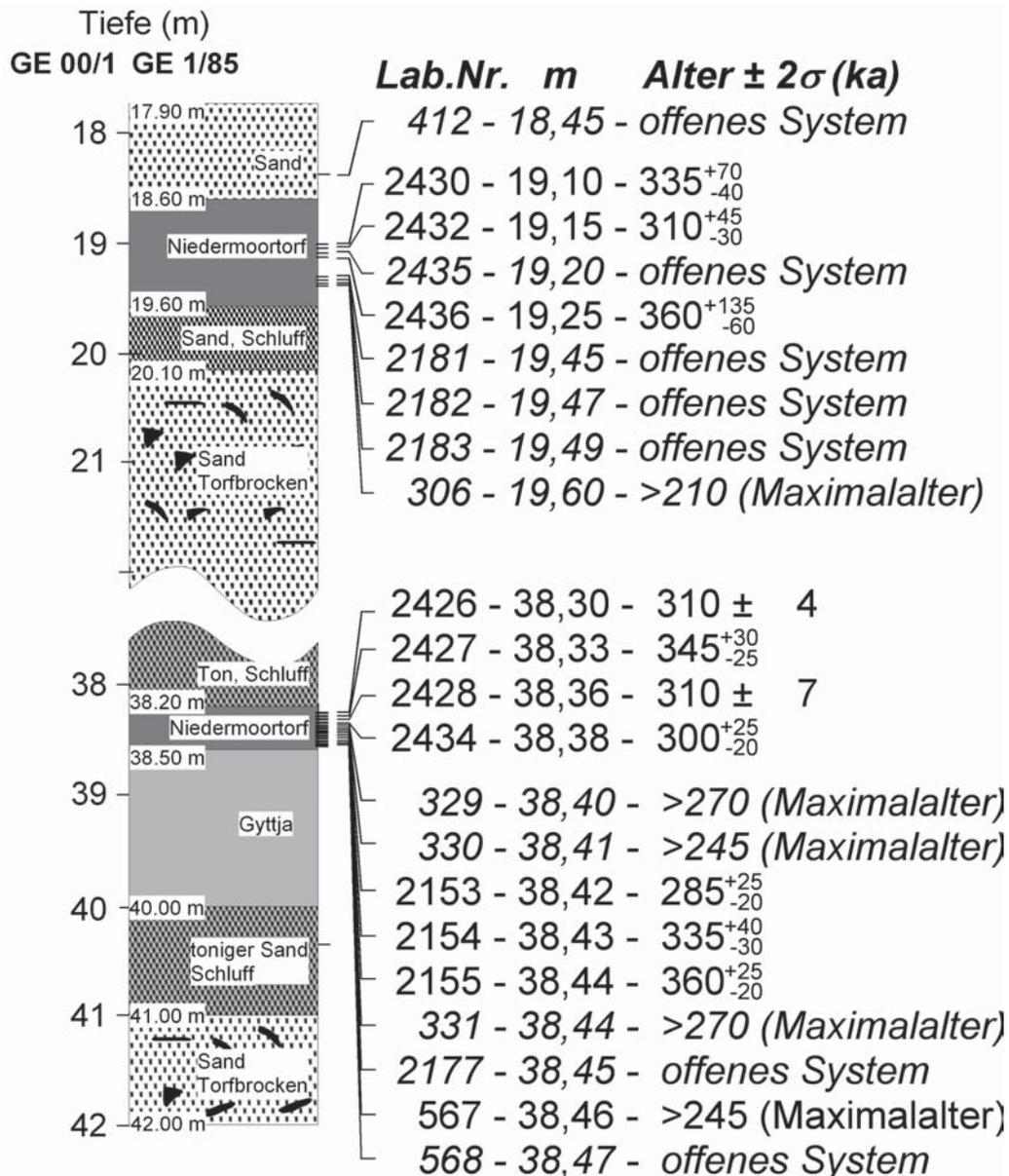
Labor Nr.	Tiefe m	Asche %	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter ka	Max.-Alter ka	Auswahlverfahren
<b>obere Schicht</b>								
412	18,45	45,5	$1,57 \pm 0,19$	$1,1756 \pm 0,1513$	$1,0095 \pm 0,1482$	offenes System		5
2430	19,10	17,9	$0,98 \pm 0,02$	$0,9891 \pm 0,0177$	$1,0785 \pm 0,0105$	$335^{+70}_{-40}$	>425	
2432	19,20	6,7	$0,90 \pm 0,020$	$0,9698 \pm 0,0168$	$1,0580 \pm 0,0059$	$310^{+45}_{-30}$	>445	
2435	19,25	9,0	$1,11 \pm 0,03$	$1,0073 \pm 0,0265$	$1,0360 \pm 0,0076$	offenes System		3;4
2436	19,30	8,4	$1,11 \pm 0,03$	$0,9876 \pm 0,0268$	$1,0475 \pm 0,0023$	$360^{+135}_{-60}$	>410	
2181	20,45	7,1	$1,75 \pm 0,07$	$1,0414 \pm 0,0424$	$1,0797 \pm 0,0169$	offenes System		4
2182	20,47	6,9	$1,93 \pm 0,02$	$1,1464 \pm 0,0166$	$1,1255 \pm 0,0134$	offenes System		1;3;4;5
2183	20,49	6,6	$1,84 \pm 0,02$	$1,0755 \pm 0,0137$	$1,1272 \pm 0,0087$	offenes System		1;3;4;5
306	20,60	81,6	$0,61 \pm 0,09$	$1,0051 \pm 0,1233$	$1,1379 \pm 0,1022$	Maximalalter	>210	
<b>untere Schicht</b>								
2426	38,30	19,0	$78,40 \pm 0,17$	$0,9839 \pm 0,0020$	$1,1584 \pm 0,0019$	$310 \pm 4$	>645	
2427	38,33	23,3	$33,96 \pm 0,46$	$0,9959 \pm 0,0113$	$1,1278 \pm 0,0019$	$345^{+30}_{-25}$	>510	
2428	38,36	22,4	$52,74 \pm 0,25$	$0,9842 \pm 0,0041$	$1,1671 \pm 0,0019$	$310 \pm 7$	>610	
2434	38,38	23,6	$66,36 \pm 1,17$	$0,9801 \pm 0,0146$	$1,1698 \pm 0,0020$	$300^{+25}_{-20}$	>490	
329	38,40	11,1	$31,56 \pm 6,97$	$0,9107 \pm 0,0614$	$1,1027 \pm 0,0478$	Maximalalter	>270	
330	38,41	10,6	$128 \pm 256$	$0,9593 \pm 0,0576$	$1,1654 \pm 0,0652$	Maximalalter	>245	
2153	38,42	21,6	$43,80 \pm 2,88$	$0,9789 \pm 0,0108$	$1,1737 \pm 0,0122$	$285^{+25}_{-20}$	>450	
2154	38,43	18,9	$1,36 \pm 0,02$	$1,0044 \pm 0,0147$	$1,1523 \pm 0,0037$	$335^{+40}_{-30}$	>490	
2155	38,44	13,0	$2,29 \pm 0,01$	$1,0088 \pm 0,0066$	$1,1411 \pm 0,0065$	$360^{+25}_{-20}$	>515	
331	38,44	6,4	$19,40 \pm 6,05$	$1,0203 \pm 0,0744$	$1,1503 \pm 0,0630$	Maximalalter	>270	
2177	38,45	22,4	$1,29 \pm 0,01$	$1,0399 \pm 0,0045$	$1,1324 \pm 0,0036$	offenes System		2;4;5
567	38,46	9,0	$128 \pm 256$	$0,9593 \pm 0,0976$	$1,1654 \pm 0,0652$	Maximalalter	>245	
568	38,47	11,5	$1,06 \pm 0,07$	$1,2292 \pm 0,0964$	$1,3841 \pm 0,1408$	offenes System		1;2

**Tab. 1**  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Einzelalter der Proben aus zwei Bohrkernen des Holstein-Typusprofils Bossel (ermittelter, zerfallskorrigierter Thorium-Index =  $0,011 \pm 0,010$ ). Alle Standardabweichungen wurden als  $\pm 2\sigma$ -Werte angegeben. – Tiefe: pollenanalytisch auf den Kern GE 00/1 bezogen. – Negativergebnisse des Auswahlverfahrens: 1-Rosholt-I; 2-Rosholt-II; 3-Osmond-I; 4-Osmond-II; 5-Isotopenentwicklung.

einzelner Proben erschweren oder gar unmöglich machen. Die Ursachen dafür werden zwar naturwissenschaftlich weitgehend verstanden, lassen sich aber nur für einen Prozess quantifizieren und durch eine entsprechende Alterskorrektur kompensieren. Ansonsten sind Auswahlverfahren anzuwenden, um hydrochemisch gestörte Isotopenverhältnisse, die zu offenen Systemen führen, zu identifizieren und von der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersberechnung auszuschließen.

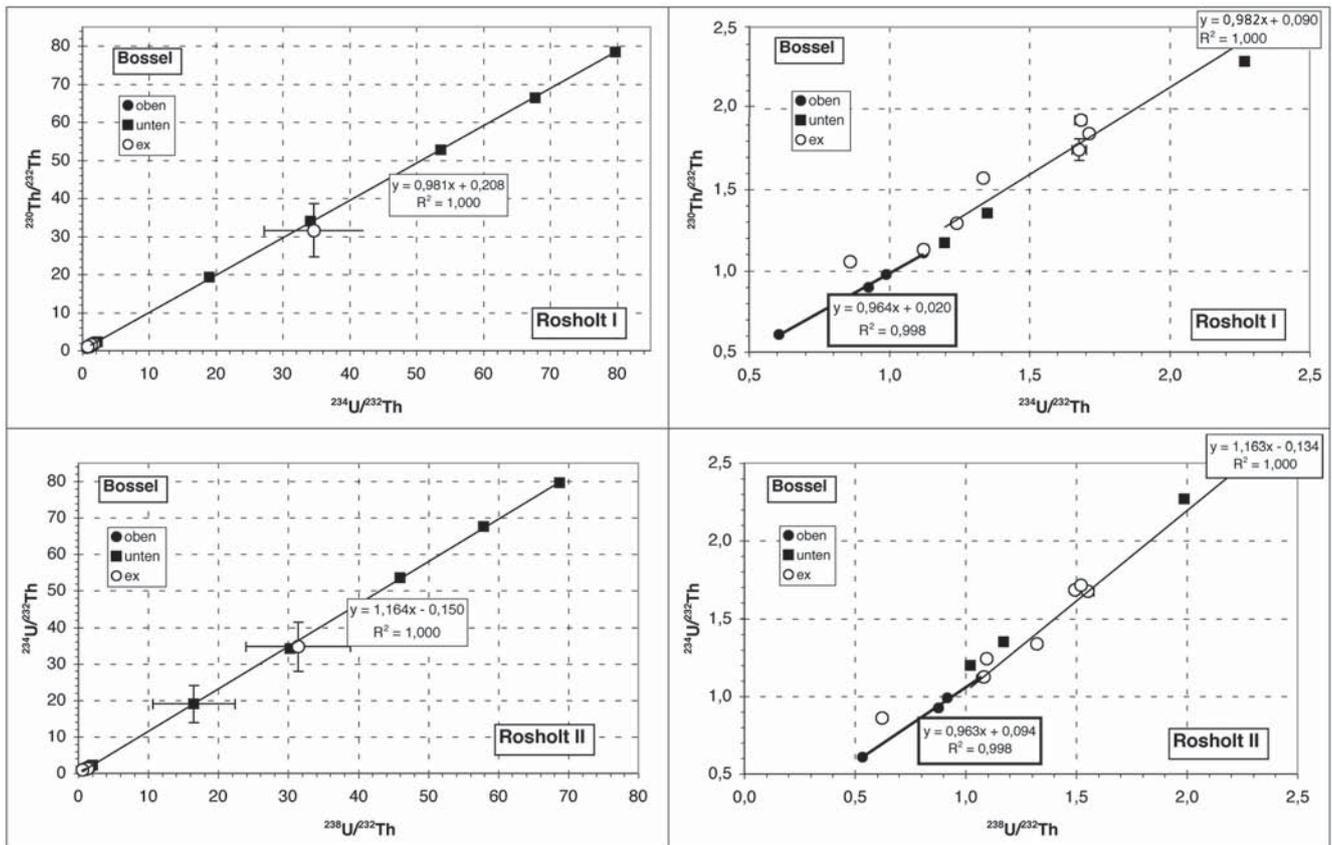
### Korrektur des detritischen $^{230}\text{Th}$ – die »Isochronen«-Methode

Staub gibt es überall, so auch beim Wachstum von Niedermoortorf. Er enthält u. a. mineralische Komponenten mit Thorium und meist auch Uran. Damit trifft eine der wichtigsten Annahmen der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methode nicht mehr zu, dass während des Wachstums von Niedermoortorf nur Uran aus dem Grundwasser eingelagert wird. Aus dem angenommenen Einkomponentensystem wird ein Zwei-Komponentensystem, in dem neben radiogenem  $^{230}\text{Th}$  aus dem Zerfall von  $^{234}\text{U}$  »detritisches«  $^{230}\text{Th}$  beteiligt ist. Die Aktivität des radiogenen  $^{230}\text{Th}$  dient als Chronometer und muss exakt aus dem gesamten  $^{230}\text{Th}$  errechnet werden. Das kann im Zweikomponentensystem unter der in der Praxis nahezu immer bestätigten Annahme geschehen, dass das detritische Thorium ein konstantes initiales  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ -Verhältnis gehabt hat. Diese



**Abb. 3** Probeentnahmestellen und <sup>230</sup>Th/U-Alter der beiden Bossel-Kerne. Die Tiefen sind pollenanalytisch auf den Kern GE 00/1 bezogen. Nur die Proben, die weit genug entfernt von den Rändern der humosen Schichten entnommen worden waren, lieferten zuverlässige <sup>230</sup>Th/U-Alter (mit revidierten Daten von Geyh / Müller 2005).

Annahme bedeutet, dass es nur eine Staubquelle mit einer bestimmbar Thorium-Isotopenzusammensetzung während des Moorwachstums gegeben hat. Da <sup>232</sup>Th wegen seiner hohen Halbwertszeit als ein quasi stabiles Isotop anzusehen ist, wird seine Aktivität zum Maß für die detritische Kontamination. Jedes duale Mischsystem lässt sich mit einer linearen Gleichung beschreiben. Beliebige Parameter der beteiligten Komponenten liefern als graphische Lösung eine Mischgerade. Darauf aufbauend hat Rosholt (1976) für die Auswertung der U/Th-Messwerte unreiner Proben zwei Diagramme vorgeschlagen. Wenn unterschiedlich detritisch belastetes Material gleichen Alters untersucht wird, ergibt sich im Rosholt-I Diagramm mit den <sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th- und <sup>234</sup>U/<sup>232</sup>Th Aktivitätsverhältnissen eine Gerade, im Rosholt-II Diagramm mit den

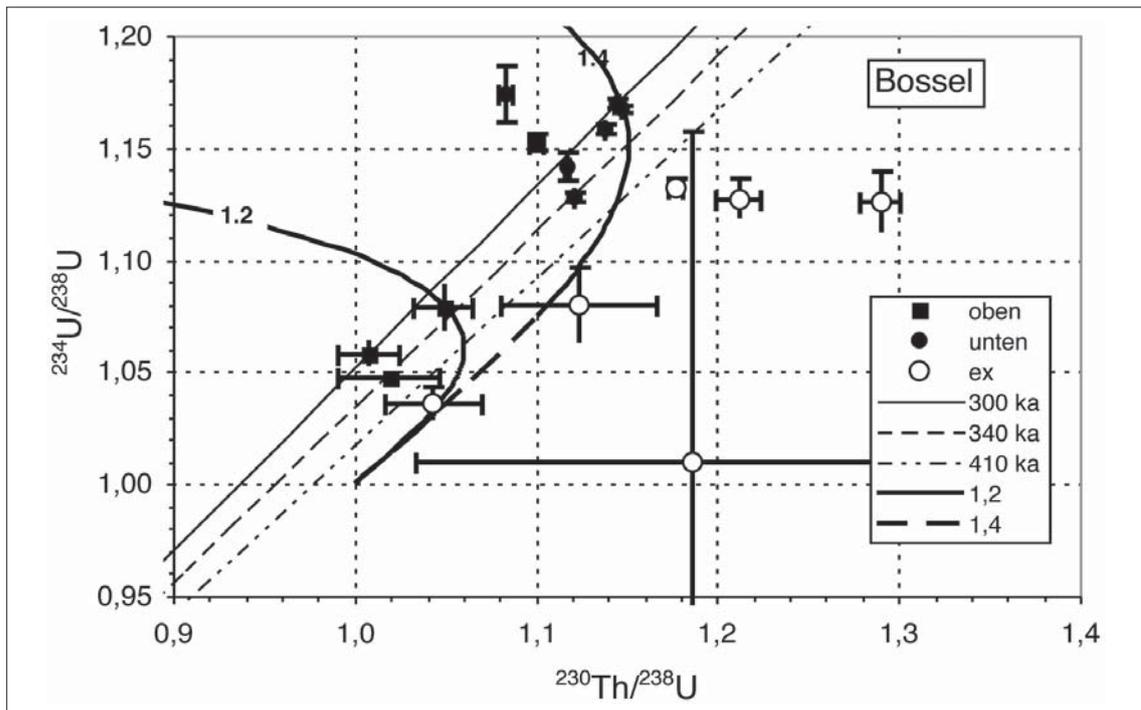


**Abb. 4** Rosholt-I und II Diagramme (Rosholt 1976): Die dick umrandeten Regressionsgleichungen beziehen sich auf die oberen Proben, die dünn umrandeten auf die unteren. – Links: kleine Auflösung. – Rechts: große Auflösung. Die meisten Standardabweichungen (2s) sind so klein, dass die Symbole die Fehlerbalken verdecken. – Oben: Rosholt-I Diagramme: Erst bei großer Auflösung werden abseits der »Isochrone« liegenden Datenpunkte sichtbar. – Unten: Rosholt-II Diagramme: Auch hier sind erst bei hoher Auflösung abseits der Gerade liegende Punkte erkennbar.

<sup>234</sup>U/<sup>232</sup>Th- und <sup>238</sup>U/<sup>232</sup>Th Aktivitätsverhältnissen eine andere (Abb. 4). Die Gerade des Rosholt-I Diagramms wird – methodisch nicht ganz korrekt – »Isochrone« genannt, weil ihre Steigung dem <sup>230</sup>Th/<sup>234</sup>U-Aktivitätsverhältnis, dem Chronometer, entspricht. Das aktuelle <sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th-AV liefert der Schnittpunkt der Gerade mit der Y-Achse. Es wird zur Berechnung der Aktivität des radiogenen <sup>230</sup>Th aus der gesamten <sup>230</sup>Th-Aktivität benötigt.

Wie **Abbildung 4** (links) für alle Messwerte des Bossel-Profiles zeigt, fallen bei kleiner Auflösung scheinbar alle Punkte auf die »Isochrone«. Erst bei großer Auflösung (**Abb. 4**, rechts) werden wenige abseits liegende Messwerte (Ex-Werte) sichtbar, die die an die <sup>230</sup>Th/U-Methode gebundene Bedingung einer dualen Mischung nicht erfüllen und deshalb von der <sup>230</sup>Th/U-Altersberechnung auszuschließen waren.

Es gibt zwei Gründe, warum nicht mehr Ex-Werte mit den Rosholt-Diagrammen erkannt worden sind: Die Uran- und Th-Gehalte als auch deren Isotopenzusammensetzungen sind nicht miteinander korreliert. Geringe Störungen dieser geochemischen Systeme wirken sich kaum gegenseitig aus. Die durch denselben Nenner der beiden Isotopenverhältnisse der Rosholt-Diagramme bedingte Null-Korrelation kann deshalb den Korrelationskoeffizient bis nahe Eins anheben (Geyh / Müller 2005; Geyh 2008). Letzterer ist daher kein Kriterium für die Zuverlässigkeit von <sup>230</sup>Th/U-Altern, wie in vielen Publikationen behauptet wird.



**Abb. 5**  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Entwicklungsdiagramm der Aktivitätsverhältnisse vom Bossel-Profil: Sieben  $\text{U}/\text{Th}$ -Isotopenverhältnisse erweisen sich als Exwerte, da sie rechts von der nicht gezeigten, aber mit der 410ka-Isochrone quasi zusammenfallenden Isochrone für unendlich große Alter liegen. Diese Werte waren von der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersbestimmung auszuschließen. Die initialen  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnisse in Torfen unterscheiden sich häufig drastisch, ohne die Ursachen genau zu kennen. Bei den Holstein-Proben waren zwei Werte von 1,2 und 1,4 maßgeblich.

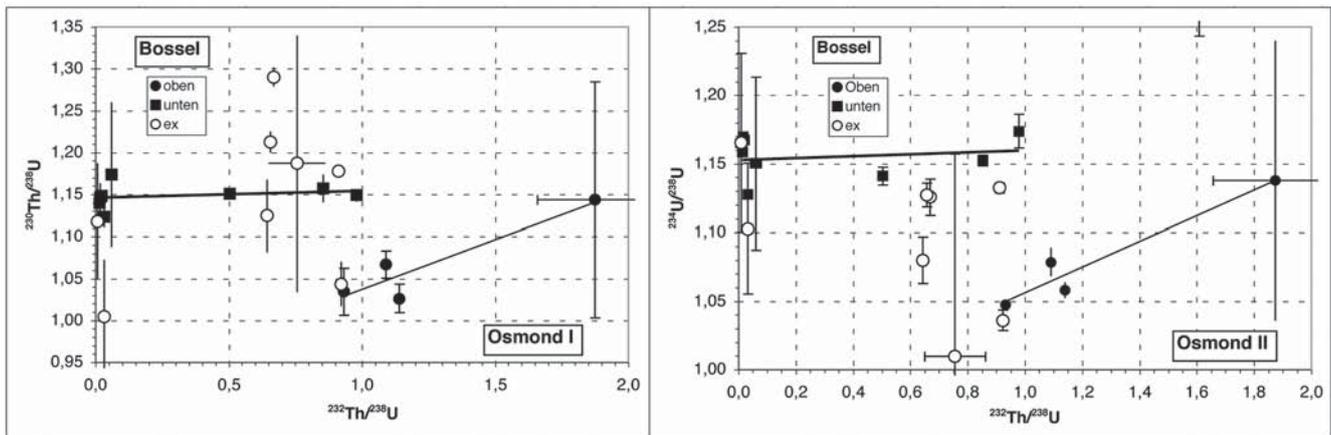
### Urangewinn/Uranverlust – offene Systeme, Drei-Komponenten-Systeme

Es gibt mehrere Prozesse, die physikalisch und geochemisch verstanden werden, aber für die es keine Parameter gibt, um fehlerhafte  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter korrigieren zu können. Als Lösung bietet sich an, die entsprechenden Messwerte sicher zu identifizieren und von der Endauswertung auszuschließen.

Der wichtigste dieser störenden Prozesse ist postsedimentärer Gewinn oder Verlust von Uran in den gelagerten und zu datierenden Ablagerungen, also die Entstehung offener Systeme. In diesem Falle sind zwei Szenarien zu unterscheiden:

1. Grundwasser, das die geohydraulisch niemals völlig dichten hangenden und liegenden Schichten viele Jahrhunderttausende lang durchflossen hat, löste Uran, sofern es Sauerstoff enthielt. Das  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis hat sich dadurch ebenso wie das  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter erhöht.
2. War das Grundwasser frei von Sauerstoff, wurde Uran an Humusstoffe gebunden. Das  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -AV nahm ab, woraus ein zu kleines  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter resultiert.

In beiden Fällen weichen die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter beträchtlich von den tatsächlichen Altern ab. Von diesen Prozessen auch betroffen ist das  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnis, weil das seltenere  $^{234}\text{U}$  leichter wasserlöslich ist als  $^{238}\text{U}$ , allerdings normalerweise nur in den oberen und unteren Randschichten. Störungen treten aber auch in Teilen der Kernzone auf, wenn z. B. sandige Einlagerungen vorhanden sind, in die Grundwasser tief eindringen kann, ohne vorher seinen gelösten Sauerstoff oder enthaltenes Uran zu verlieren.



**Abb. 6** Isotopen-Diagramme nach Osmond (1970): Es ergeben sich für die obere und untere humose Schicht unterschiedliche Gerade, die die geänderten ökologischen Bedingungen während ihrer Entstehung widerspiegeln.

Osmond-I Diagramm	bestens geeignet
Isotopenentwicklungsdiagramm	bestens geeignet
Osmond-II Diagramm	sehr gut geeignet
Rosholt-I Diagramm	geeignet
Rosholt-II Diagramm	weniger geeignet

**Tab. 2** Eignung der verschiedenen Auswahlverfahren.

Die Rosholt-I und Rosholt-II Diagramme erweisen sich nicht nur im vorliegenden Fall als wenig effizient, um Aktivitätsverhältnisse gestörter Proben (offene Kreise in **Abb. 4**) zu identifizieren. Wesentlich effektiver ist das Isotopenentwicklungsdiagramm (**Abb. 1; 5**), in dem alle sieben Ex-Werte erkennbar sind.

Gleichermaßen effizient sind die beiden Osmond-I und Osmond-II Diagramme (**Abb. 6**; Osmond u. a.

1970). Bei ihnen werden die  $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - über den  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnissen bzw. die  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ - über den  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ -Aktivitätsverhältnissen aufgetragen. Vier der Aktivitätsverhältnisse liegen abseits der beiden Geraden, die für die oberen und unteren Schichten zu unterscheiden sind. Die größere Effizienz der Osmond-Diagramme ist im Vergleich zu den Rosholt-Diagrammen darauf zurückzuführen, dass jede geochemische Störung (z. B. Uranmobilisation) des angenommenen radioaktiven Gleichgewichts zwischen dem Mutterisotop  $^{238}\text{U}$  und seinem Tochterisotop  $^{234}\text{U}$  die entsprechenden U/Th-Aktivitätsverhältnisse so stark verändert, dass die Nullkorrelation den Korrelationskoeffizient nicht mehr auf Eins anzuheben vermag. Die Beobachtung, dass für die unteren und oberen organischen Ablagerungen des Bosselprofils je eine Gerade erhalten wird, spiegeln die unterschiedlichen ökologischen Bedingungen zu Beginn und in der Mitte des Holstein-Interglazials wider (Geyh / Müller 2005).

Ein anderes störendes Problem besteht, wenn sich das Uran- oder Thorium-Isotopenverhältnis im Grundwasser bzw. Staub während des Niedermoorwachstums geändert hat. In diesem Fall liegen Drei- oder Mehrkomponentensysteme vor, die in den Rosholt-Diagrammen an zwei oder mehr parallelen »Isochronen« gleicher Steigung zu erkennen sind, sofern ausreichend viele Probenpunkte vorliegen. Dieses Problem ist beim Bossel-Profil nicht relevant.

Der naheliegende Versuch, die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter über der Tiefe aufzutragen und deren Zuverlässigkeit an einer Zunahme zu erkennen, scheitert an der zu geringen Genauigkeit von  $\pm 10$  bis  $> \pm 25$  ka ( $2\sigma$ ) der Einzelwerte (**Tab. 1**). Die bisher erreichte altersmäßige Auflösung reicht gerade zu einer sicheren Zuordnung zu einzelnen MIS-Stadien aus.

Die Effizienz der beschriebenen Auswahlverfahren zum Erkennen gestörter und ungestörter Isotopenverhältnisse wurde mit sehr vielen  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten interglazialer organischer Ablagerungen in Deutschland,

**Tab. 3** Mittelwerte und Standardabweichungen ( $\pm 2\sigma$ ) der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter vom Holstein-Typusprofil Bossel.

	Alter (ka)	Standardabweichung		$\chi^2$	Probenzahl
		Einzelwert (ka)	Mittelwert (ka)		
Obere Schicht	325	$\pm 25$	$\pm 13$	0,7	3
Untere Schicht	311	$\pm 12$	$\pm 12$	10,6	7
Beide Schichten	312	$\pm 12$	$\pm 4$	11,6	10

Österreich, der Schweiz, von Weißrussland, Russland und Litauen ermittelt (Tab. 2). Dazu ist ergänzend zu bemerken, dass keines der Auswahlverfahren der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersbestimmung allein alle ungeeigneten Aktivitätsverhältnisse zu identifizieren vermochte. Um konsequent zu sein, wurden alle Datensätze ausgeschlossen, die von wenigstens einem Verfahren als für die Altersbestimmung ungeeignet erkannt worden sind, auch wenn das entsprechende  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter scheinbar zu allen anderen gepasst hat.

### ERGEBNISSE DER RADIOMETRISCHEN ALTERSBESTIMMUNG DES HOLSTEIN-INTERGLAZIALS

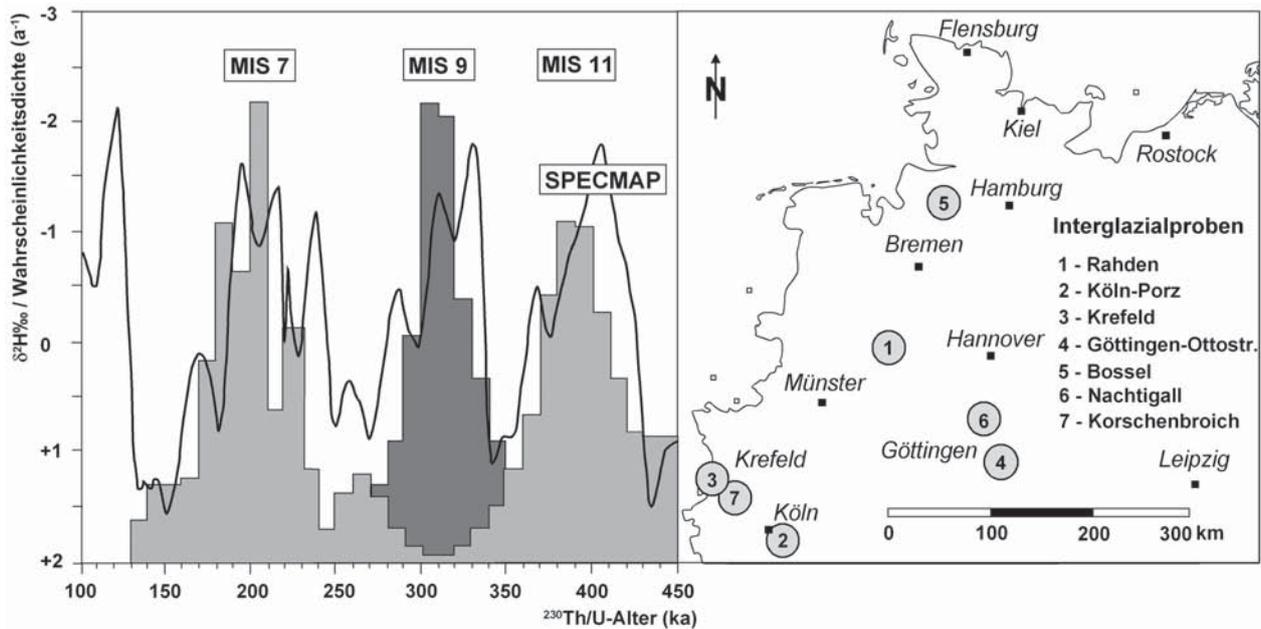
15 der 22 datierten Proben erwiesen sich als geschlossene Systeme; fünf lieferten radiometrisch  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Maximalalter, die nicht verwertbar sind. Die Standardabweichung des Mittelwerts der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter (Abb. 3; Tab. 3) hat sich auf  $\pm 4$  ka gegenüber früher (Geyh / Müller 2005) leicht erhöht, da die verbesserten Auswahlverfahren (Geyh 2008) zwei weitere Messwerte ausgesondert haben.

Die Standardabweichungen der Mittelwerte sind nur mathematisch relevant und spiegeln kaum die erreichbare Präzision der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersbestimmung von Torfen wider. Sie dürfte eher der mittleren Standardabweichung der Einzelwerte entsprechen. Das bedeutet, dass beim derzeitigen Stand der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methode zwar unterschiedliche Interglaziale altersmäßig sicher voneinander unterschieden werden können, aber eine höher aufgelöste Chronostratigraphie eines Interglazials nicht zu erreichen ist.

Nach unseren Ergebnissen sind die organischen Ablagerungen des Holstein-Typusprofils Bossel zuverlässig dem MIS 9 zuzuordnen. Zusätzlich gestützt wird dieses Ergebnis durch neue IR-RF-Daten. Deren Datierungsbereich ist nach Vergleich mit Ergebnissen anderer radiometrischen Datierungsmethoden größer als der der OSL-Methoden.

### WEITERE INTERGLAZIALVORKOMMEN IN DEUTSCHLAND

Die Schwierigkeiten, denen Quartärgeologen, Pollenanalytiker und Paläobotaniker gegenüber stehen, wenn sie Interglazial- und Glazialablagerungen den marinen MIS-Stadien zuordnen wollen, spiegeln sich in den z. T. widersprüchlichen altersmäßigen Zuordnungen wider, die insbesondere bei unvollständigen »Interglazial«-Vorkommen am Fluss Dömnitz (Lkr. Prignitz), Wacken (Kr. Steinsburg), in Schöningen (Lkr. Helmstedt) und in Reinsdorf (Lkr. Helmstedt) deutlich werden. Aus dieser Sicht ist das Eingeständnis des Quartärgeologen Lothar Eißmann (Leipzig) wissenschaftlich nicht hoch genug zu werten, der trotz seiner umfassenden Erfahrungen nach Aufnahme von über 1000 km Quartär-Profilen in den mitteldeutschen Tagebauen bekennt (Eißmann 2002), nur die obere der beiden oberhalb der glazialen Elster-Ablagerungen immer



**Abb. 7** Histogramm der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten vor-eezeitlicher interglazialer Ablagerungen in Deutschland. Die Zuverlässigkeit der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter spiegelt sich in der engen Anlehnung ihrer Häufungen an die MIS-Stadien ungerader Zahlen wider. Die kleinen Gipfel zwischen 290-250 und 160-130 ka gehören zu den wenigen  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter, die von den Auswahlverfahren nicht erfasst werden konnten. Die Kurve im linken Teil entspricht dem Verlauf der  $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve der SPECMAP (Imbrie u. a. 1984).

wieder vorzufindenden organischen Interglazialschichten sicher dem Eem zuordnen zu können. Die unteren organischen Ablagerungen gehören seiner Ansicht nach entweder dem MIS 7 oder dem MIS 9 an.

Neue  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter um 320 ka von Proben des »Reinsdorf«-Interglazials (vgl. u.; Beitrag Sierralta / Frechen / Urban in diesem Band) entsprechen denen der Holstein-Proben aus Bossel. Analoge Ergebnisse sind für das »Schöningen«-Interglazial zu erwarten, wenn die beschriebenen Auswahlverfahren konsequent auf die auf dem Workshop vorgestellten Messwerte angewandt werden.

Die methodische Zuverlässigkeit der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter interglazialer Torfe wird mit Datierungen weiterer Interglazialvorkommen in Deutschland belegt, wobei es unwichtig ist, dass einige von ihnen pollenanalytisch nicht mit der marinen Isotopenchronologie zu korrelieren waren. Das Histogramm (**Abb. 7**) der 61  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter vor-eezeitlicher Proben zeigt drei enge Häufungen bei den ungeraden MIS-Stadien, die Interglaziale repräsentieren. Die  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter gehören zu Proben aus Bossel (13 von 22  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten), aus dem Tagebau Schöningen (9 von 13 früherer  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten), der Grube Nachtigall (Lkr. Holzminden; 10 von 14  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten), der Ottostraße in Göttingen (16 von 19 Ergebnissen; Grüger 1994) und aus Kernbohrungen in Köln-Porz (3 von 3  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten), Rahden (Lkr. Münden-Lübecke; 4 von 5  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten), Krefeld (3 von 3  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten) und Korschenbroich (Rhein-Kreis Neuss; 3 von 3  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten). Die neuen  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter vom »Reinsdorf-Interglazial« (vgl. u.; Beitrag Sierralta / Frechen / Urban in diesem Band) und die vom Profil Tottenhill in Norfolk PE33/GB (Rowe u. a. 1997) passen bestens zu diesem Histogramm. Wären viele der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter dieser organischen Ablagerungen unzuverlässig, hätte es Häufungen von Ausreißern in Glazialperioden (gerade MIS-Stadien) geben müssen. Es fallen aber nur wenige  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter in die glazialen Zeitabschnitte 250-290 ka und 130-160 ka. Sie wurden von den Auswahlverfahren nicht erfasst, weil es für die Auswertung mit den Osmond- und Rosholt-Diagrammen zu wenig Daten (<3) gegeben hat. Es werden nämlich immer mehr als drei Aktivitätsverhältnis-Paare benötigt, um eine zuverlässige »Isochrone« festzulegen. Zwei Punkte werden von jeder Geraden getroffen.

## NEUE IR-RF-DATEN ZUM ALTER DES HOLSTEIN-INTERGLAZIALS

Krbetschek / Eißmann (2008) geben eine zusammenfassende Darstellung einer auf geochronometrische Daten gestützten Einordnung des Saale-Komplexes, die sich auf langjährige Forschungen insbesondere im Typgebiet der Elster- und Saale-Eiszeit stützt. Aus Gründen des Aufschluss- und Bearbeitungsstandes werden darin vorerst Angaben zum Holstein-Interglazial, der Liegendgrenze dieses Abschnittes, auf einzelne Vorkommen beschränkt. Im letzten Jahrzehnt ist eine sichere Datierung mittelpleistozäner Sedimente mit der Entwicklung der Infrarot-Radiofluoreszenzdatierung (IR-RF) möglich geworden, die von Trautmann u. a. (1999) unter der Bezeichnung Radiolumineszenzdatierung (RL) erstmal vorgestellt wurde. Trotz internationaler wissenschaftlicher Anerkennung (z. B. Boetter-Jensen u. a. 2003) ist die Anwendung noch immer auf das Lumineszenz-Datierungslaboratorium Freiberg (Institut für Angewandte Physik der TU Freiberg) beschränkt, weil bisher Messgeräte kommerziell nicht angeboten werden. Vergleiche mit unabhängigen physikalischen Datierungsverfahren wurden bis etwa 300 ka erfolgreich durchgeführt (Degering / Krbetschek 2007). Physikalische Grundlagenuntersuchungen (z. B. Erfurt / Krbetschek 2003) lassen einen noch weitaus höheren Datierungsbereich bis zu 500 ka, im günstigen Fall bis 800 ka, erwarten.

Die mit dieser Methode ermittelten radiometrischen Alter von Proben, die mittelbare und unmittelbare Belege zur Einstufung des Holstein-Interglazials geben, beziehen sich auf die letzte Lichtexposition der Sedimentpartikel während des Transports und der Ablagerung:

1. Die Datierung des Holsteins von Munster-Breloh/Lüneburger Heide (Lkr. Heidekreis; Müller 1974; neue Bohrung und pollenanalytische Bearbeitung durch die Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Geologisches Institut) erbrachte ein Alter von  $334 \pm 21$  ka: Degering / Krbetschek 2007).
2. Pollenanalytische Daten (T. Litt) und IR-RF Daten (M. Krbetschek) des 1996 temporär aufgeschlossenen Holstein-Vorkommens von Benndorf bei Leipzig (Lkr. Delitzsch) werden derzeit für eine Publikation vorbereitet. Ein erstes vorläufiges Alter von  $354 \pm 24$  ka liegt vom liegenden, spätelsterzeitlichen »Krippehnaer Schotter« vor. Für die hangenden frühsaalezeitlichen schluffigen Sande wurden  $293 \pm 35$  ka und  $280 \pm 20$  ka erhalten. Eine Korrelation der Interglazialsedimente zu MIS 9 ist damit anzunehmen.
3. Frühsaalezeitliche Sedimente (Saale-Komplex) von Wallendorf und Klinge (Lkr. Forst) lieferten Ergebnisse bis in den Zeitbereich um 300 ka (Krbetschek u. a. 2008), die im geologischen Kontext ebenfalls eine Zuordnung des Holsteins zum MIS 9 nahe legen und eine Korrelation mit MIS 7 ausschließen.
4. Die IR-RF Datierungen am Profil Schöningen 13-II sind noch nicht abgeschlossen. Die vorläufigen Ergebnisse liefern ein sicheres maximales Alter des »Reinsdorf«- Interglazials entsprechend MIS 9. Ein jüngeres Alter ist nach den bisher vorliegenden Daten nicht sicher auszuschließen.

Eine tiefer gehende methodische Bewertung älterer TL-Daten von Schöningen (Karelin 1997) soll hier nicht vorgenommen werden. Sie sind prinzipiell nicht gänzlich zu verwerfen, da sie vorteilhaft an zwei unterschiedlichen Mineralfraktionen (Quarz und Kalifeldspat) durchgeführt worden sind. Auch diese Ergebnisse legen eine Einstufung des »Reinsdorf«-Interglazial in MIS 9 nahe.

## DISKUSSION IM LICHT NEUER VERÖFFENTLICHUNGEN ZUM HOLSTEIN BZW. MIS 9/MIS 11

Die Publikationen über das Holstein/Hoxnian-Interglazial der letzten Jahrzehnte liefern vielfältige Belege, dass es mit pollenanalytischen, paläobotanischen, quartärgeologischen und lithostratigraphischen Metho-

den allein nicht gelingt, terrestrische Ablagerungen eindeutig und sicher einzelnen marinen Isotopenstadien (MIS) zuzuordnen. Nur in zwei Fällen wurden Interglazial-spezifische Eigenschaften gefunden, die aus verschiedenen Gründen allerdings nicht in allen Profilen nachweisbar sind. Erfolgreicher waren multidisziplinäre Studien, in die mehrere, als zuverlässig anwendbar erwiesene radiometrische Altersbestimmungsmethoden (Geyh 2005) einbezogen worden sind (Rowe u. a. 1997; 1999; Geyh / Müller 2005; Degeering / Krbetschek 2007; Krbetschek / Eißmann 2008; Krbetschek u. a. 2008, Sierralta / Frechen / Urban in diesem Band). Auch Warvenzählungen (Müller 1974; 1992; Müller / Höfle 1994; Meyer 1974) haben dazu beigetragen.

Geyh / Müller (2005) haben vier nachprüfbare Argumente für die Zuordnung des Holstein-Interglazials zum MIS 9 in die wissenschaftliche Diskussion eingebracht:

1. Das mittlere  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter der Proben vom Holstein-Typusprofil Bossel beträgt  $312 \pm 4$  ka. Es ist mit dem  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter von  $317 \pm 14$  ka (Rowe u. a. 1997) vergleichbar, das vom Profil Tottenham/Nar Valley/UK bestimmt worden ist. Ventris (1996) hatte diese Ablagerungen in das Hoxnian-Interglazial eingestuft, was allerdings inzwischen umstritten ist (C. Turner, pers. Mitt.). Der scheinbare Widerspruch unserer Einordnung zu den  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten des englischen Hoxnian-Typusprofils Marks Tey (Rowe u. a. 1999), die an der weniger geeigneten Karbonatfraktion limnischer Sedimente bestimmt worden waren, besteht nach der Berechnung der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Maximalalter von  $>245$  ka aus den veröffentlichten Messwerten nicht mehr (Geyh / Müller 2005). Diese Proben waren mit 95% Wahrscheinlichkeit älter als 245 ka, schließen also eine Einstufung in MIS 9 nicht aus.
2. Eine unverwechselbare interglazialspezifische Eigenschaft des Holstein-Interglazials ist ein in seiner Mitte aufgetretener kurzer Klimarückschlag, in dem die Zahl der thermophilen Bäume stark abnahm und *Taxus* ganz verschwand (Geyh / Müller 2007). Ein vergleichbarer Klimaverlauf ist in den älteren Rhume- und Praclaux-Interglazialen nicht vorhanden. Der Einwand von Nitychoruk u. a. (2006), dass so kurze Klimaänderungen pollenanalytisch nicht erfassbar seien, gilt für Pollenzählungen an jahreszeitlich geschichteten Sedimenten nicht.
3. Ein eindeutiges Indiz zur Identifikation des Rhume-Interglazials sind die zwei Gelgenbach-Interstadiale, die etwa 10 ka nach ihm auftraten und mit den beiden Jagonas-Interstadien nach dem Praclaux-Interglazial zu vergleichen sind. Es gibt keine Pendants in einem der nachfolgenden Interglaziale, insbesondere nicht nach dem Holstein- und dem Landos-Interglazial.
4. Das Holstein-Interglazial dauerte nach Diatomen-Warvenzählungen 15000-16000 Jahre (Müller 1974; Meyer 1974). Dazu kommt ein kurzes Spätglazial (Müller / Höfle 1994), das nach Linke (1993) etwa 2500 Jahre lang war. Das gesamte Rhume-Interglazial umfasst etwa 25000 Jahresschichten (Müller 1992; Bittmann / Müller 1996). Dazu kommt das etwa 8400 Jahre dauernde Spätglazial. Die deutlich unterschiedlichen Zeitspannen der beiden Interglaziale entsprechen denen von MIS 9 und MIS 11 der Altersskalen der Antarktischen Eiskerne von Vostok (Petit u. a. 1999) und vom Dom C (EPICA Community Members 2004).

Es ist nur schwer nachvollziehbar, warum diese klar formulierten und wissenschaftlich überprüfbaren Argumente einer Zuordnung des Holstein-Interglazials zum MIS 9 in späteren Arbeiten, in denen die Zuordnung des Hoxnian- oder Holstein-Interglazials zum MIS 11 verteidigt werden, nicht auf- oder angegriffen werden.

Lediglich Nityrochouk u. a. (2006) versuchen mit physikalischen Argumenten, eine Zuordnung des Holstein-Interglazials zum MIS 11 zu belegen, die aber einer seriösen Prüfung nicht standhalten. Die methodischen, selten quantifizierbaren Schwierigkeiten bei der Interpretation von  $\delta^{18}\text{O}$ -Profilen limnischer Sedimente werden zwar angesprochen, aber nicht konsequent berücksichtigt. Die Korrelation des limnischen  $\delta^{18}\text{O}$ -Profils vom See Ossówka in Ostpolen (bei Biała Podlaska in der Woiwodschaft Lublin; Nitychoruk 2000;

Nitychoruk u. a. 2005) mit einem marinen  $\delta^{18}\text{O}$ -Profil ist daher weder visuell noch mathematisch nachvollziehbar. Auch die TL-Daten von 431,7 bis 430,9ka BP sind für diesen Korrelationsversuch ungeeignet (Krupiński 1995), da sie eine Genauigkeit vortäuschen, die um mindestens eine Größenordnung über der tatsächlich erreichbaren liegt. Abgesehen davon fallen diese TL-Alter in einen Bereich, der mit dieser älteren Datierungsmethode sicher nicht erreichbar war (Wintle 2008; Zöller 2010). Letztendlich wird das revidierte ESR-Alter eines Knochens aus Hoxnian-Schichten angeführt (Grün / Schwarz 2000), das ursprünglich eine Zuordnung zum MIS 9 belegen sollte (Grün u. a. 1988; Schwarcz / Grün 1993). Die aus denselben Messwerten berechneten revidierten ESR-Alter zwischen 100-400ka hängen entscheidend von der Wahl des Modells ab, das die Aufnahme von Uran im Knochen während Alterung beschreibt. Diese Wahl muss ohne gesicherte Annahmen getroffen werden. Entgegen der Darstellung in dieser Publikation werden die ESR-Alter nicht durch die parallel bestimmten  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter sicherer, weil Knochen als offene Systeme keine zuverlässige  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Altersbestimmung zulassen.

Abgesehen davon haben die zwei bisher durchgeführten internationalen Vergleichstests (Hennig u. a. 1985; Barabas u. a. 1993) keine überzeugenden Beweise für die Zuverlässigkeit von ESR-Daten an sich geliefert. Zuletzt behaupten Nitychoruk u. a. (2006) ohne Angabe wenigstens eines Grundes oder ein Zitat, dass  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierungen organischer Ablagerungen unzuverlässig seien.

Roe u. a. (2009) stellen paläobotanische Analogieschlüsse für ihre Zuordnung des Hoxnian-Interglazials zum MIS 11 vor. Dieses Ergebnis ist ähnlich problematisch wie die anderer methodisch analoger Arbeiten. Ein Beleg dafür mag die Zuordnung des »Schöningen-Interglazials« zu MIS 7 sein, die nach den vorläufigen, auf dem »Schöningen«-Workshop vorgestellten, aber noch nicht endgültig ausgewerteten  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Ergebnissen (Sierralta / Frechen / Urban in diesem Band) in Frage zu stellen ist.

Auch die neuen Aminosäure-stratigraphischen Ergebnisse von Roe u. a. (2009) lassen die Frage nach einer Zuordnung zu MIS 9 oder MIS 11 offen. Die Arbeit geht auf keines der vier oben genannten Argumente ein, verweist allerdings in einem Zitat auf unsere abweichende Auffassung. Roe u. a. distanzieren sich vehement von der Vorstellung (Geyh / Müller 2006), dass es zwei holstein-ähnliche Interglaziale (auch Scourse u. a. 1999, Scourse 2006) im Quartär auf den Britischen Inseln gegeben haben mag, nicht aber in den Region der südlichen Nordsee und der westlichen Ostsee. Sie drängen auf eine Fortsetzung umfassender multidisziplinärer Studien zu Holstein-ähnlichen Interglazialen über England hinaus.

Meijer / Cleveringa (2009), die eine umfassende Aminosäure-Stratigraphie der mittel- und spätpleistozänen Ablagerungen in den Niederlanden und des südlichen Nordseebeckens vorstellen, ordnen das Holstein-Interglazial dem MIS 9 zu, ohne auf die vier Argumente im Einzelnen einzugehen. Auch sie haben Belege, dass *Pterocarya*-Pollen keine Holstein-Anzeiger sind.

Ashton u. a. (2008) diskutieren neue Ergebnisse von Aminosäure-, Pollen und Käferuntersuchungen an interglazialen Sedimenten in Hoxne. Die Autoren ordnen danach die Nach-Hoxnian-Sequenz dem späten MIS 11 zu und vergleichen ihre Ergebnisse mit anderen palynologischen Sequenzen in Europa. Mit den vorliegenden radiometrischen Daten setzen sie sich nicht auseinander.

Toucanne u. a. (2009) bezeichnen ihre an bis 1,2Ma alten marinen Sedimenten vom Golf von Biscaya gewonnenen Ergebnisse als so gesichert, dass sie jede weitere Diskussion über die Gleichstellung des Holstein-Interglazials mit MIS 11 ausschließen. Ihre Argumentation stützt sich im wesentlichen auf eine Zuordnung der Elster-Eiszeit zu MIS 12, für das die höchste Sedimentationsrate während der letzten 1,2Ma gefunden wurde. Die Autoren bleiben allerdings den Beweis schuldig, dass die untersuchten Sedimente nur glazialen Ursprungs waren und begründen nicht, warum es gerade die Elster-Eiszeit und keine frühere die höchste Ablagerungsrate gehabt haben soll. Unsere  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten vom Bossel-Profil als auch die Ergebnisse anderer Autoren, die zu einer Zuordnung zum MIS 9 führen, bezeichnen Toucanne u. a. (2009) als spekulativ, ohne dafür nachvollziehbare und überprüfbare Argumente anzugeben.

## ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es bisher keine wissenschaftlich ernst zu nehmende Auseinandersetzung mit den Argumenten von Geyh / Müller (2005) für eine Zuordnung des Holstein-Interglazials zu MIS 9 gibt. Keine der neueren wissenschaftlichen Publikationen hat diese chronologische Zuordnung widerlegt. Das von 308-316 ka reichende mittlere  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Alter ( $2\sigma$ ) der Proben vom Holstein-Typusprofil Bossel ist nach Anwendung aller bekannten Korrektur- und Auswahlverfahren sehr belastbar, darf allerdings nicht mit der Dauer des Holstein-Interglazials verwechselt werden. Die Zuverlässigkeit der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten interglazialer organischer Ablagerungen wurde mit entsprechenden Ergebnisse voreem-zeitlicher Proben aus Deutschland und England mehrfach nachgewiesen.

Methodisch unabhängige Radiolumineszenz-Datierungen (IR-RF-Methode) an holsteinzeitlichen Sedimenten bzw. Proben aus Liegend- und Hangendschichten sprechen ebenfalls für eine Zuordnung des Holstein-Interglazials zu MIS 9. Für beide radiometrische Methoden wurden Auswerteverfahren angewendet, die verlässliche Korrekturen für Auswirkungen störender Primär- und Sekundäreffekte oder einen sicheren Ausschluss unzuverlässiger Messwerte von der Altersbestimmung erlauben („Isochronen«-Methode bei der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Datierung; single-aliquot-Technik bei der IR-RF-Datierung). Die Ergebnisse beider Methoden haben externe Vergleichstests ( $^{230}\text{Th}/\text{U}$ ) bzw. Paralleluntersuchungen an stratigraphisch gleich alten Proben (IR-RF) erfolgreich bestanden. Damit sind die wesentlichen Voraussetzungen als erfüllt anzusehen, diese radiometrischen Daten und die damit verbundene Zuordnung der Holstein-Interglazials in Deutschland zu MIS 9 als zuverlässig anzusehen.

## LITERATUR

- Ashton u. a. 2008: N. Ashton / S. G. Lewis / S. A. Parfitt / K. E. H. Penkman / G. R. Coope, New evidence for complex climate change in MIS 11 from Hoxne, Suffolk, UK. *Quaternary Science Reviews* 27 (7-8), 2008, 652-668.
- Barabas u. a. 1993: M. Barabas / R. Walther / A. Wieser / U. Radtke / R. Grün, Second interlaboratory-comparison project on ESR dating. *Applied Radiation and Isotopes* 44, 1993, 119-129.
- Bassinot u. a. 1994: F. C. Bassinot / L. D. Labeyrie / E. Vincent / X. Quidelleur / N. J. Shackleton / Y. Lancelot, The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matuyama magnetic reversal. *Earth Planetary Science Letters* 126, 1994, 91-108.
- Bittmann / Müller 1996: F. Bittmann / H. Müller, The Kärlich Interglacial site and its correlation with the Bilshausen sequence. In: C. Turner (Hrsg.), *The Early Middle Pleistocene in Europe. Proceedings INQUA Subcommission on European Quaternary Stratigraphy, Cromer-Symposium, Norwich 1990 (Rotterdam 1996)* 187-193.
- Boetter-Jensen u. a. 2003: L. Boetter-Jensen / S. W. S. McKeever / A. G. Wintle, *Optically Stimulated Luminescence Dosimetry* (Amsterdam 2003).
- Degering / Krbetschek 2007: D. Degering / M. R. Krbetschek, Dating of Interglacial Deposits by Luminescence Methods. In: F. Sirocko / M. Claussen / M. F. Sánchez-Goni / Th. Litt (eds), *The Climate of Past Interglacials. Developments in Quaternary Science* 7 (Amsterdam 2007) 157-172.
- Eißmann 2002: L. Eißmann, Quaternary geology of eastern Germany (Saxony, Saxon-Anhalt, south Brandenburg, Thüringia), type area of the Elsterian and Saalian Stages in Europe. *Quaternary Science Reviews* 21, 2002, 1275-1346.
- Emiliani 1955: C. Emiliani, Pleistocene temperatures. *Journal of Geology* 63, 1955, 538-573.
- EPICA community members 2004: EPICA Community Members, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429, 2004, 623-628.
- Erfurt / Krbetschek 2003: G. Erfurt / M. R. Krbetschek, Studies on the physics of the infrared radioluminescence of potassic feldspar and on the methodology of its application to sediment dating. *Radiation Measurements* 37, 2003, 505-510.
- Geyh 2005: M. A. Geyh, *Handbuch der physikalischen und chemischen Altersbestimmung* (Darmstadt 2005).
- 2008: M. A. Geyh,  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating of interglacial and interstadial fen peat and lignite: Potential and limits. *Eiszeitalter und Gegenwart. Quaternary Science Journal* 57 (1-2), 2008, 78-98.
- Geyh / Müller 2005: M. A. Geyh / H. Müller, Numerical  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating and a palynological review of the Holsteinian/Hoxnian Interglacial. *Quaternary Science Reviews* 24, 2005, 1861-1872.
- Geyh / Müller 2005a: M. A. Geyh / H. Müller, Reply: Missing evidence for two Holstein-like Interglacials. Reply to the comments by J. D. Scourse: Numerical  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating and a palynological review of the Holsteinian/Hoxnian Interglacial. *Quaternary Science Reviews* 25, 2005, 3072-3073.
- Geyh / Müller 2007: M. A. Geyh / H. Müller (2007). Palynological and geochronological study of the Holsteinian/Hoxnian/ Landos Interglacial. In: F. Sirocko / M. Claussen / M. F. Sánchez-Goni / Th. Litt (Hrsg.), *The Climate of Past Interglacials. Developments in Quaternary Science* 7 (Amsterdam 2007) 387-396.

- Geyh / Techmer 1997: M. A. Geyh / A. Techmer,  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ -Datierungen der organogenen Sedimente der Bohrung Groß Todtsborn (Kr. Harburg, Niedersachsen). Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft 4, 1997, 103-110.
- Geyh u. a. 1997: M. A. Geyh / G. Hennig / D. Oezen, U/Th-Datierung interglazialer und interstadialer Niedermoortorfe und Lignite – Stand und Zukunft. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft 4, 1997, 187-200.
- Grüger u. a. 1994: E. Grüger / H. Jordan / D. Meischner / P. Schlie, Mittelpleistozäne Warmzeiten in Göttingen, Bohrungen Ottostraße und Akazienweg. Geologisches Jahrbuch A 134, 1994, 167-210.
- Grün / Schwarcz 2000: R. Grün / H. P. Schwarcz, Revised open system U-series/ESR age calculations for teeth from Stratum C at the Hoxnian Interglacial type locality, England. Quaternary Science Reviews 19, 2000, 1151-1154.
- Grün u. a. 1988: R. Grün / H. P. Schwarcz / J. Chadam, ESR dating of tooth enamel: coupled correction for U-uptake and U-series disequilibrium. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 14/1-2, 1988, 237-241.
- Heijnis 1992: H. Heijnis, Uranium/thorium dating of Late Pleistocene peat deposits in N.W. Europe [unpubl. Diss. Univ. Groningen 1992] <http://dissertations.uib.rug.nl/faculties/science/1992/h.heijnis/> (13.09.2012).
- Heijnis / van der Plicht 1992: H. Heijnis / J. van der Plicht, Uranium/Thorium dating of Late Pleistocene deposits in NW Europe, uranium/thorium isotope systematics and open-system behaviour of peat layers. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section) 94, 1992, 161-171.
- Heijnis u. a. 1993: H. Heijnis / J. Ruddock / P. Coxon, A uranium-thorium dated late Eemian or early midlandian organic deposit from near Kilfenora between Spa and Fenit, Co. Kerry, Ireland. Journal of Quaternary Science 8, 1993, 31-43.
- Hennig u. a. 1985: G. J. Hennig / M. A. Geyh / R. Grün, The first inter Laboratory ESR comparison project phase II: Evaluation of equivalent doses (ED) of calcites. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 10, 1985, 945-952.
- Imbrie u. a. 1984: J. Imbrie / J. H. Hays / D. G. Martinson / A. McIntyre / A. C. Mix / J. J. Morley / N. G. Pisias / W. L. Prell / N. J. Shackleton, The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine  $\delta^{18}\text{O}$  record. In: A. L. Berger / J. Imbrie / J. Hays / G. Kukla (Hrsg.), Milankovitch and climate: Understanding the response to astronomical forcing. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Milankovitch and Climate, Palisades, New York, November 30 – December 4, 1982 (Dordrecht u. a. 1984) 269-305.
- Karelin 1997: P. Karelin, Untersuchungen zur Datierungsanwendung des  $325^\circ\text{C}$ -TL-Peaks in Quarzen aus dem nordischen Vereisungsgebiet Deutschlands [unpubl. Diss. Univ. Heidelberg 1997].
- Krbetschek / Eißmann 2008: M. R. Krbetschek / L. Eißmann, Geochronologische Daten aus der Typregion der Elster- und Saale-Inlandvergletscherungen. Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt (Wien) 62, 2008, 169-171.
- Krbetschek u. a. 2008: M. R. Krbetschek / D. Degering / W. Alexowsky, Infrarot-Radiofluoreszenz-Alter (IR-RF) unter-saalezeitlicher Sedimente Mittel- und Ostdeutschlands. Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 159/1, 2008, 133-140.
- Krupiński 1995: K. M. Krupiński, Pollen stratigraphy and succession of vegetation during the Mazovian interglacial based on studies of sediments from Podlasie. Acta Geographica Lodziensia 70, 1995, 1-200.
- Linke 1993: G. Linke, Zur Geologie und Petrographie der Forschungsbohrung qho 1-5, der Bohrung Hamburg-Bilbrook und des Vorkommens von marinem Holstein im Gebiet Neuwerk-Scharhörn. Geologisches Jahrbuch A 138, 1993, 35-76.
- Litt u. a. 2005: T. Litt / D. Ellwanger / E. Villinger / S. Wansa, Das Quartär in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsletter of Stratigraphy 41/1-3, 2005, 385-399.
- Meijer / Cleveringa 2009: T. Meijer / P. Cleveringa, Aminostratigraphy of Middle and Late Pleistocene deposits in The Netherlands and the southern part of the North Sea Basin. Global and Planetary Change 68, 2009, 326-345.
- Meyer 1994: K.-J. Meyer, Pollenanalytische Untersuchungen und Jahresschichtzählungen an der holsteinzeitlichen Kieselgur von Hetendorf. Geologisches Jahrbuch A 21, 1994, 87-105.
- Müller 1992: H. Müller, Climatic changes during and at the end of the interglacials of the Cromerian Complex. In: G. J. Kukla / E. Went (eds), Start of a Glacial. Nato ASI Series, 13 (Berlin, Heidelberg 1992) 55-69.
- 1994: H. Müller, Pollenanalytische Untersuchungen und Jahresschichtzählungen an der holstein-zeitlichen Kieselgur von Munster-Breloh. Geologisches Jahrbuch A 21, 1994, 107-140.
- Müller / Höfle 1994: H. Müller / H.-C. Höfle, Das Holstein-Interglazialvorkommen bei Bossel westlich von Stade und Wanhöden nördlich Bremerhaven. Geologisches Jahrbuch A 134, 1994, 71-116.
- Nitychoruk 2000: J. Nitychoruk, Climate reconstruction from stable-isotope composition of the Mazovian Interglacial (Holsteinian) lake sediments in eastern Poland. Acta Geologica Polonia 50, 2000, 247-294.
- Nitychoruk u. a. 2005: J. Nitychoruk / K. Bińka / J. Hoefs / H. Ruppert / J. Schneider, Climate reconstruction for the Holsteinian Interglacial in eastern Poland and its comparison with isotope data from marine Isotope Stage 11. Quaternary Science Reviews 24, 2005, 631-644.
- 2006: J. Nitychoruk / K. Bińka / H. Ruppert / J. Schneider, Holsteinian Interglacial = Marine Isotope Stage 11? Quaternary Science Reviews 25 (21-22), 2006, 2678-2681.
- Osmond u. a. 1970: J. K. Osmond / J. P. May / W. F. Tanner, Age of the Cape Kennedy barrier and lagoon complex.  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating of interglacial and interstadial fen peat and lignite: Potential and limits. Journal of Geophysical Research 75, 1970, 469-479.
- Petit u. a. 1999: J. R. Petit / J. Jouzel / D. Raynaud / N. I. Barkov / J. M. Barnola / I. Basile / M. Bender / J. Chappellaz / J. Davis / G. Delaygue / M. Delmotte / V. M. Kotlyakov / M. Legrand / V. Lipenkov / C. Lorius / L. Pépin / C. Ritz / E. Saltzman / M. Stievenard, Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. Nature 399, 1999, 429-436.
- Reille u. a. 2000: M. Reille / J.-L. de Beaulieu / H. Svobodova / V. Andrieu-Ponel / C. Goeury, Pollen analytical biostratigraphy of the last five climatic cycles from a long continental sequence from the Velay region (Massif Central, France). Journal of Quaternary Science 15/7, 2000, 665-685.
- Roe u. a. 2009: H. M. Roe / G. R. Coope / R. J. N. Devoy / C. J. O. Harrison / K. E. H. Penkman / R. C. Preece / D. C. Schreve, Differentiation of MIS 9 and MIS 11 in the continental record: vegetational, faunal, aminostratigraphic and sea-level evidence from coastal sites in Essex, UK. Quaternary Science Reviews 28, 2009, 2342-2373.

- Rosholt 1976: J. N. Rosholt,  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating of travertine and caliche rinds. The Geological Society of America, Abstracts and Program 8, 1976, 1076.
- Rowe u. a. 1997: P. J. Rowe / D. A. Richards / T. C. Atkinson / S. H. Bottrell / R. A. Cliff, Geochemistry and radiometric dating of a Middle Pleistocene peat. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61, 1997, 4201-4211.
- 1999: P. J. Rowe / T. C. Atkinson / C. Turner, U-series dating of Hoxnian interglacial deposits at Marks Tey, Essex, England. *Journal of Quaternary Sciences* 14/7, 1999, 693-702.
- Schwarzc / Grün 1993: H. P. Schwarzc / R. Grün, ESR dating of the lower industry. In: R. Singer / B. G. Gladfelder / J. J. Wymer (Hrsg.), *The Lower Paleolithic Site at Hoxne, England (Chicago 1993)* 203-205.
- Scourse 2006: J. D. Scourse, Comment on: Numerical  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating and a palynological review of the Holsteinian/Hoxnian Interglacial by Geyh and Müller. *Quaternary Science Reviews* 25 (21-22), 2006, 3070-3071.
- Scourse u. a. 1999: J. D. Scourse / W. E. N. Austin / H. P. Sejrup / M. H. Ansari, Foraminiferal isoleucine epimerization determinations from the Nar Valley Clay, Norfolk, UK; implications for Quaternary correlations in the southern North Sea Basin. *Geological Magazine* 136, 1999, 543-560.
- Shackleton 1969: N. J. Shackleton, The last interglacial in the marine and terrestrial records. *Proceedings of the Royal Society of London B* 174, 1969, 135-154.
- Shackleton / Opdyke 1973: N. J. Shackleton / N. D. Opdyke, Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238: Oxygen isotope temperatures and ice volumes on a  $10^5$  year and  $10^6$  year scale. *Quaternary Research* 3/1, 1973, 39-55.
- Toucanne u. a. 2009: S. Toucanne / S. Zaragosi / J. F. Bourillet / P. L. Gibbard / F. Eynaud / J. Giraudeau / J. L. Turon / M. Cremer / E. Cortija / P. Martinez / L. Rossignol, A 1.2 Ma record of glaciation and fluvial discharge from the West European Atlantic margin. *Quaternary Science Reviews* 28, 2009, 2974-2981.
- Trautmann u. a. 1999: T. Trautmann / M. R. Krbetschek / A. Dietrich / W. Stolz, Feldspar radioluminescence: A new dating tool and its physical background. *Journal of Luminescence* 85, 1999, 45-58.
- Urey 1950: H. C. Urey, The high temperature stage in the evolution of the terrestrial planets. *Science* 112 (2912), 1950, 451-452.
- van der Pflicht / Heijnis 1989: J. van der Pflicht / H. Heijnis, Dating by uranium/thorium disequilibrium. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Working Meeting »Isotopes in Nature«, Leipzig, September 1989 (Leipzig 1989)* 181-192.
- van der Wijk u. a. 1986: A. van der Wijk / F. El-Daoushy / A. R. Arends / W. G. Mook, Dating peat with U/Th disequilibrium: Some geochemical considerations. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)* 59, 1986, 283-292.
- Ventris 1996: P. Ventris, Hoxnian interglacial freshwater and marine deposits in northwest Norfolk, England and their implications for sea-level reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 15, 1996, 437-450.
- Wintle 2008: A. Wintle, Luminescence dating: where it has been and where it is going. *Boreas* 37, 2008, 471-482. DOI 10.1111/j.1502-3885.2008.00059.x.
- Zöller 2010: L. Zöller, New approaches to European loess: a stratigraphic and methodical review of the past decade. *Central European Journal of Geosciences* 2/1, 2010, 19-31.

## ZUSAMMENFASSUNG / ABSTRACT

### Zum radiometrischen Alter des Holstein-Interglazials

Die Diskussion über die Einstufung des Holstein-Interglazials in eines der Stadien der marinen Isotopenchronologie (MIS) engte sich in den letzten Jahrzehnten immer mehr auf MIS 11 ein, gestützt vor allem auf pollenanalytische, sedimentologische und quartärgeologische Analogieschlüsse. Die Schwächen dieser Methodik sind bekannt und können nur durch eine stärkere Einbindung radiometrischer Datierungsmethoden überwunden werden, so wie es in England schon mit unterschiedlichem Erfolg praktiziert wird. Die Anwendung der  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Methode auf torfige Proben des Holstein-Typusprofils Bossel lieferte mit  $312 \pm 4$  ka ein mittleres radiometrisches Alter, das für eine Zuordnung zu MIS 9 spricht. Das Ergebnis ist methodisch gesehen sehr belastbar, weil es auf nachvollziehbaren Prüf- und Auswahlverfahren der Messergebnisse beruht. Es wird zusätzlich durch  $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -Daten anderer interglazialer Ablagerungen als auch neue Radiolumineszenz-Daten vor- und nach-holsteinzeitlicher Sedimente aus Deutschland bestätigt.

### Radiometric Ages of the Holsteinian Interglacial Stage

Over the last several decades, pollen analyses, and sedimentological and Quaternary geology studies have increasingly pointed to assignment of the Holsteinian Interglacial to MIS 11 (Stage 11 of the marine isotope chronology). The well known weaknesses of these methods can be overcome only by radiometric dating methods, as have been used in the UK with differing degrees of success. A mean age of  $312 \pm 4$  ka has been obtained with the  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating method on peaty material from the Holsteinian Type Section at Bossel in northern Lower Saxony, Germany. This result places the Holsteinian Interglacial Stage in MIS 9. This result can be viewed as reliable as it is based on a comprehensive procedure for testing the validity of the raw data and selection of the useful values. This assignment is confirmed by  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  dating of other palynologically coeval interglacial deposits as well as by new radioluminescence ages for pre- and post-Holsteinian sediments in Germany.