

## Die Entstehung und Entwicklung des Wollingster Sees und seiner Ablagerungen.

- J. Merkt & A. Kleinmann, Hannover -

### Zusammenfassung

Der Wollingster See ist eine im Weichselglazial entstandene große Pingo-Narbe. Das folgt aus der Lage und dem Aufbau des an den See angelehnten Seebergs, aus der Morphologie des Beckens, aus dem vorhandenen Randwall und der Natur der älteren Beckenfüllung, die aus weichselzeitlichen Schluffen und Tonen aus aufgearbeitetem elsterzeitlichen Lauenburger Ton besteht, der durch den Eiskern des Pingos angehoben worden war. Die holozäne organische Mudde ist 9 m mächtig. Die häufigen Sandlagen während der letzten 8000 Jahre sind teilweise äolisch. In den spätglazialen Ablagerungen von 1 m Mächtigkeit sind vom Meiendorf bis zur Jüngeren Tundrenzeit alle Zeitzonen repräsentiert. Erstmals in einem nordwestdeutschen See sind die Bölling-zeitlichen Ablagerungen gewarnt. 250 ± 20 Jahreswarven wurden gezählt.

### Abstract: Origin and development of lake Wollingst and its sediments

Lake Wollingst is a big pingo scar, formed during the Weichselian glaciation. This is evidenced by the position of the Seeberg adjacent to the lake, the morphology of the basin, the existence of a rampart and the nature of the older sediments: weichselian lacustrine silt and clay from reworked elsterian Lauenburger Ton, which had been lifted by the ice of the pingo core. The holocene organic mud is 9 m thick and monotonous, apart from frequent sandy streaks which are in part of eolian origin. The Lateglacial section encompasses in 1 m the complete suite of biozones from the Meiendorf to the Younger Dryas. The sapropelic mud of the Bölling period consists of 250 ± 20 varves which is unique in NW-Germany.

### 1 Lage, Geologie der Umgebung, Methoden

Der Wollingster See (300 x 180 m, ca. 14,5 m tief) liegt in Wasserscheide-Position bei ca. 15,3 m NN neben dem Seeberg, der sich 7 m über den See erhebt. Während der See in eine Ebene eingetieft ist, die aus Geschiebelehm besteht, ist der Seeberg aus horizontal geschichtetem Schmelzwassersand aufgebaut, der den Geschiebelehm überlagert. Das Nebeneinander von See und Seeberg ist zu ungewöhnlich und zu eng, um als Zufallsprodukt erklärt zu werden. Jede Erklärung der Genese hat darauf Rücksicht zu nehmen.

In der Umgebung des Wollingster Sees bis in Ufernähe sind durch LADE (1974, 1979) eine größere Anzahl tieferer Sondierbohrungen und mehrere auf einem Profilkreuz angeordnete maschinelle Bohrungen (bis ca. 30 m) niedergebracht. Insofern ist der Aufschlußstand besser als gewöhnlich. Unmittelbar am SW-Rand des Sees steht ferner eine 279 m tiefe hydrogeologische Aufschlußbohrung. Dort folgen über 200 m miozänen tonigen Schluffen, denen zum Hangenden Feinstsand beigemischt ist, 20 m (80-60 m unter Gelände = u.G.) pleistozäne feinsandige Feinstsande, gelegentlich mit mittelsandigen Lagen, 5 m (60-55 m u.G.) feinsandiger bis grobsandiger Mittelsand, 14 m (55 - 41 m u.G.) feinsandiger Mittelsand mit etwas Grobsand. Diese Schmelzwassersande werden von 16 m (25-41 m u.G.) grauem, tonigem Schluff, dem elsterzeitlichen Lauenburger Ton, überlagert, der zum Hangenden feinsandige Lagen enthält. 20 m (25-5 m u.G.)

saalezeitlicher Geschiebemergel und Geschiebelehm sowie weitere 5 m weichselzeitliche Mittel- bis Feinsande mit humosen und schluffigen Schichten schließen das Profil ab.

Dennoch ist unsere Kenntnis des Untergrundes des Seebeckens und vor allem der Beckenränder nicht detailliert genug, um die Frage der Genese mit einfachen und eindeutigen Indizien zu beantworten. Die Versuche, mit modernsten geophysikalischen Verfahren (Boden-Radar, Sediment-Echolot CHIRP, refraktionsseismisches Unterschießen mit Sissy, Elektromagnetik) die mitteltiefen Untergrundverhältnisse im Seebecken und vor allem den Bau seiner Ränder zu klären, schlugen fehl.

Wir haben inzwischen 4 Bohrungen in dem See niedergebracht, davon 2 auf über 30 m unter Wasserspiegel. Der Kern einer 1995 niedergebrachten Stechrohr-Bohrung Wo1 wurde sedimentologisch, palynologisch und geochemisch untersucht. Dafür wurden bis zu einer Tiefe von 28,3 m Glühverlustanalysen<sup>1</sup> mit fortlaufender Beprobung in 1 cm Abstand durchgeführt, 27 Dünnschliffe von je 10 cm Länge untersucht und 102 Proben geochemisch (Haupt- und Spurenelemente mit RFA, organischer Kohlenstoff (Corg) und Gesamtschwefel (Stot) mit LECO) analysiert. Die Ergebnisse werden unten vorgestellt.

## 2 Bisherige Erklärungen der Genese des Seebeckens

LADE hat in seinen umfassenden Arbeiten 1974 und 1979 vier Entstehungsmöglichkeiten für den See und den Seeberg vorgelegt und sie unter Abwägen der Indizien ausführlich diskutiert:

1. Salzablaugung: Nachbrechen über dem unterlagernden Zechsteinsalz. LADE betont zu Recht, dass eine solche Genese undenkbar ist, da das Salz im Untergrund des Sees etwa 2000 m tief liegt. Subrosion über mehr als 1000 m ist bisher nicht bekannt.
2. Pingo: Ein Pingo entsteht im Permafrostbereich, wenn in einem lokal aufgetauten Areal vor einer erneut allseits vorrückenden Gefrierfront infolge der Ausdehnung des gefrierenden Wassers überschüssiges Bodenwasser gefangen und auf einen immer kleiner werdenden Raum zusammengedrängt wird. Die anwachsende Wasserlinse preßt die dünne inzwischen gefrorene Deckschicht über sich zu einem Hügel empor. Anschließend gefriert das Wasser meist ebenfalls. Pingohügel können mehrere 100 m Durchmesser und 50 m Höhe erreichen. Von ihren Flanken wird Erdreich abgetragen, das sich am Fuß des Hügels ansammelt. Wenn der Pingokern austaut, sinkt der Hügel wieder zusammen. Die alte Geländeoberfläche kann nicht mehr entstehen, denn die von den Flanken abgetragenen Massen fehlen nun im Zentrum, wo sich ein See bildet. Das am Hügelfuß angesammelte Material wird zu einem sanften Ringwall verschliffen (siehe auch: DE GANS 1982).
3. Toteis: Ein riesiger Block aus isoliertem Gletschereis wird von Glazialsedimenten überlagert, die ihn zunächst vor dem Abschmelzen bewahren. Beim Schmelzen des Blocks am Ende der Eiszeit entsteht ein Toteissee (=Soll).
4. Strudelloch (sensu LUNDBECK 1938): Schmelzwasser am Grunde des Gletschers spült durch hydraulische Kräfte in bereits abgelagerte glaziale Sedimente ein Loch. Das ausgespülte, unmittelbar daneben wieder abgelagerte Material könnte möglicherweise die Entstehung des Seebergs erklären.

<sup>1</sup> Wir danken Herrn M. RIEKE, der die Glühverlustanalysen durchgeführt hat.

LADE hat sich für die Toteis-Genese entschieden und den Seeberg als ein zufällig stehengebliebenes Os gedeutet, eine Hypothese, die wenig wahrscheinlich ist.

Eine 5. Möglichkeit, die Genese der Struktur zu erklären, wäre ein hydrodynamic blowout, wie ihn CHRISTIANSEN & al. (1982) für einen kanadischen See in vergleichbarer Lage belegt haben. Dort gelangte Schmelzwasser unter hydraulischem Druck durch den überlagernden Gletscher und wurde in hoch-durchlässigen Schichten mehrere Kilometer ins Vorland transportiert, wo es an einer Schwachstelle aus über 100 m Tiefe zur Oberfläche ausbrach und dabei einen See ausspülte. Die Entstehung müßte in unserem Falle saalezeitlich, und zwar nach der Drenthe-Zeit während der Warthe-Vereisung stattgefunden haben, als deren Eisfront (Endlage) etwa 10-15 km entfernt lag. Gegen einen solchen hydrodynamischen Ausbläser spricht außer heuristischen Erwägungen, dass die durchlässigen Schichten im Untergrund nicht existieren.

Eine Entstehung des Seebeckens während der Saale-Eiszeit (Alternativen 3, 4 und 5) würde bedeuten, dass der See bereits während der ca. 11 000 Jahre dauernden Eem-Warmzeit bestanden hätte, unter klimatischen Bedingungen, die denen der heutigen Warmzeit gleichen. Die Hohlform müßte in diesem Falle eemzeitliche Seesedimente in beträchtlicher Mächtigkeit enthalten.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Pingo

Nach unseren Untersuchungen ist der Wollingster See die Narbe eines riesigen weichselzeitlichen Pingos. Die Gründe für diese Annahme und für die Zurückweisung anderer Entstehungsursachen sind:

1. In den o.g. 4 Bohrungen wurden verschiedene Profile angetroffen; nur die nördlichste im zentralen Tief ergab ein vollständiges Spät- und Postglazial, was für die Beckenausbildung eines Solls ungewöhnlich wäre. Die anderen 3 Bohrungen trafen mehr oder weniger früh auf Sand bzw. auf eine lebhaft wechselnde Schichtung mit Pollenassoziationen aus aufgearbeiteten und schlecht erhaltenen Pollen, die eine Datierung nicht erlaubten. Es handelt sich also um ein sehr enges Becken mit uneinheitlichem bzw. gestörtem Randbereich. Die Tiefe des Beckens von mehr als 31 m ist außergewöhnlich und war 1974 ein Ausschlußkriterium für LADE. Inzwischen sind Pingo-Narben von über 15 m Tiefe aus der Fachliteratur bekannt.
2. Die tiefste Bohrung traf im Liegenden der spätglazialen Ablagerungen über 5 m feingeschichtete Seesedimente aus dem Pleniglazial an, die aus dem an der Beckenflanke anstehenden Lauenburger Ton aufgebaut sind. Sie sind nach unserer Abschätzung aufgrund von teilweise erhaltenen Jahreslagen innerhalb weniger Jahrhunderte und unmittelbar vor dem Spätglazial abgelagert worden. Die Schichtchen vergrößern sich zum Liegenden stark; die Basis dieses Schichtpaketes war bei 31 m Tiefe jedoch nicht erreicht. Nach ihrer sedimentologischen Ausbildung markieren diese basalen Schichten etwa den Beginn der Füllung eines übersteilten Seebeckens. Eine Fortsetzung dieser kaltzeitlichen Sedimentation zum Liegenden während weiterer knapp 100 000 Jahre des Weichselglazials bis zu einem eventuellen Eem-See ist bei der Größe des Beckens wegen der geringen Standfestigkeit der Ablagerungen nicht vorstellbar.
3. Eemzeitliche Schichten wurden nicht gefunden, sie müßten erheblich tiefer als 31 m liegen, was allein wegen der möglichen Böschungsneigung mit zunehmender Tiefe unwahrscheinlicher wird: Die Basis der Bohrung steht bereits einige Meter unter dem Top des

mit 24 bis 27 m unter Gelände flach lagernden Lauenburger Tons, die unterlagernden Sande sind noch weniger standfest als dieser (vgl. die in Kap.1 erwähnte Bohrung). Eine Beckengenese als Toteisloch impliziert die wenig wahrscheinliche Annahme eines Toteisblockes, der durch den saalezeitlichen Gletscher viele Meter tief in den sonst ungestört lagernden Lauenburger Ton eingepresst worden wäre. Auch die modifizierte Hypothese eines als Toteisloch entstandenen Eem-Sees, der während der Weichsel-Kaltzeit als Pingo verjüngt worden wäre, ist zu verwerfen. In einem solchen Falle hätten in der pleni- und spätglazialen Beckenfüllung neben den Florenelementen aus dem Lauenburger Ton, die tatsächlich vorhanden sind (frdl. mündl. Mitt. H. MÜLLER), Reste eemzeitlicher Pollenspektren gefunden werden müssen.

4. Der Seeberg mit seinen glazifluviatil transportierten und abgelagerten Sanden war für LADE (1974) ein weiteres Ausschlußkriterium für die Entstehung des Beckens als Pingo, da er als Randwall aufgefaßt wurde und Randwälle nur als "Rutschmassen" vorstellbar waren. Der Seeberg ist jedoch zwanglos als Derivat des drenthezeitlichen Schmelzwassersandes erklärbar. Der Sand wurde durch das unter Druck stehende Wasser aus dem Pingo gefördert. Dem Seeberg entsprechende, an einen Pingo angelehnte Sedimentkegel aus ausgespülten Sanden kann man an rezenten arktischen Pingos (Spitzbergen) beobachten. Die Sande des Seebergs sind heute etwa horizontal geschichtet, mit einer leichten Neigung zum See hin. Das vermutlich ursprünglich nach außen gerichtete Schichtfallen ist durch Rückkippen des an den Pingo angelehnten Sedimentkegels beim Abschmelzen des Grundeises mit seinen in die nähere Umgebung reichenden Apophysen verständlich.
5. Die von LADE (1974: Abb. 5, 6) mehrfach in seerandnahen Bohrungen in geringer Tiefe dokumentierten "intra-drenthezeitlichen" Beckenschluffe könnte man auch als weichselzeitlich umgelagerten Lauenburger Ton interpretieren, der ähnlich wie der Sand des Seeberges aus dem damals aufgewölbten Pingo-Hügel heraustransportiert und am Fuß abgelagert wurde, oder als eistektonische Einpressungen von Lauenburger Ton, wofür ein Vorkommen (LADE 1974: Abb. 5) spricht, das unter dem Randwall angetroffen wurde.
6. Zwar ist der bei einem Pingo zu fordernde Randwall, in dem das Material aus der Pingo-Narbe abgelagert ist, am Wollingster See noch weniger imposant als bei anderen großen Pingos, deren Randwälle allerdings regelmäßig unerwartet bescheiden sind. Der verschliffene Wall ist jedoch im Westen und Südwesten des Sees erkennbar.

### 3.2 Die Seesedimente

Bei der zeitlichen Gliederung beziehen wir uns auf die Ergebnisse der pollenanalytischen Untersuchung (MÜLLER & KLEINMANN 1998, in diesem Band). Die Angabe der Alter erfolgt in Kalenderjahren vor 1950 (MERKT & MÜLLER 1997). Die Seesedimente sind nach visuellen und nach mikroskopischen Befunden beschrieben; zum besseren Verständnis ist der Vergleich mit dem Diagramm der Glühverlustanalyse (Abb.1) hilfreich. Alle Tiefenangaben erfolgen in Meter unter mittlerem Wasserspiegel.

#### Neuzeit (14,2 - 16,5 m)

Die obersten 1,8 m des Sedimentprofils Wo1 sind stark anthropogen gestört: einerseits derart homogenisiert, dass eine pollenanalytische Untergliederung nicht möglich ist, andererseits ungewöhnlich hoch mit Blei, Arsen und Zink belastet. Wir wissen nicht sicher, wodurch die Durchmischung verursacht wurde und wie alt die Sedimente an ihrer Basis sind. Tiefe und Art der Störung sprechen für ein einzelnes Ereignis von kurzer Dauer in jüngster Zeit. Nach Aus-

kunft von Wollingster Einwohnern sind "im letzten Krieg von angeschossenen Bomberflugzeugen einige Bomben auf der Linie des Sees abgeworfen worden"<sup>2</sup>. Daher nehmen wir an, dass die Störung mit dem letzten Krieg zu tun hat. Sicher ist, dass die Störung in der Pollenzone FIRBAS X nach dem späten Mittelalter einsetzt. Die mit der Pollenanalyse belegte Hanfrotte (lt. Pollenanalyse im 15. Jh.), die den See für einige Zeit extrem eutrophierte, fand ihren Niederschlag in Schichten, die 40 cm unterhalb der Basis der Durchmischung liegen.

#### Neuzeit bis Mittelholozän (16,5 - 21,5 m)

Es folgt bis 21,5 m (Grenze Subboreal/Atlantikum, 5660 Jahre v.h.) eine etwa 5,5 m mächtige, feindetritische, zum Liegenden hin feiner werdende Mudde, mit einem erheblichen, in den unteren 2 m kontinuierlich abnehmenden Sandgehalt. Die Mudde ist nicht erkennbar geschichtet; es treten aber feine Sand-Zonen bzw. -lagen auf, die teilweise auch mit bloßem Auge sichtbar sind. Im Dünnschliff erkennt man Schluff- und Sandkörner, die unklassiert, in unscharf begrenzten Zonen, vereinzelt auch in Nestern, in wechselnder Konzentration und mit verschiedenem Korngrößenspektrum in der organischen Matrix „frei schwimmen“. Die größeren Körner sind gut gerundet. Feinschichtung ist durch Bioturbation zerstört worden. Die Herkunft der Sandkörner läßt sich aus ihrer Vergesellschaftung mit anderen Partikeln klären. Zwei Extreme sind zu beobachten: Einerseits Sandlagen, die mit organischem Detritus aus Flachwasserpflanzen (*Chara*, Laubmoos) und Detritus aus der Ufernähe (Zweigstückchen, Blätter) auftreten. Diese Sande dürften mit Aufarbeitung im Uferbereich zusammenhängen, bei der aufgewirbeltes Material an den steilen Seehängen ins Profundal transportiert wurde. Erosion im Flachwasser kann neben extremen Wetterlagen und Seespiegelschwankungen auch auf menschliche Tätigkeit in Seenähe hinweisen. Andererseits finden sich häufig Sandlagen, die keine Beimischung von grobem pflanzlichen Detritus aus der Flachwasserzone haben. Wir halten diese Sande für Flugsande. Holzkohlepartikel sind in den Schichten der letzten 3000 Jahre immer vorhanden; ihr Anteil am Sediment ist jedoch in den als Flugsand interpretierten Sandlagen besonders hoch. Die Korngrößen der Holzkohlepartikel überschreiten häufig die üblichen 15-30µ und erreichen bis 700µ, was auf Feuer in unmittelbarer Nähe deutet.

Planktische Diatomeen und Chrysophyceen-Zysten wurden nicht gefunden. Unter den wenigen Diatomeen überwiegen Formen mit groben Wandstrukturen: epiphytische und benthische Formen wie *Pinnularia*, *Surirella*. Auch diese sind angelöst, meist verbogen oder zerbrochen. Schwammstacheln sind häufig, aber immer zerbrochen. Daraus folgt, dass die diagenetischen Prozesse in den Sedimenten in diesem sauren See die biogene Kieselsäure angegriffen haben. Im unteren Meter dieses Profilabschnittes werden Konzentration, Korngröße und die Lagen des Sandes kleiner, und der Flugsand-Einfluß schwindet. Abschnittsweise erscheinen nun planktische Diatomeen. Der Anteil der Holzkohle-Splitter ist immer noch deutlich.

#### Mittel-Altholozän (21,5 - 23,53 m)

Mit fließendem Übergang folgt dunkelgraue bis schwarze Feindetritus-Mudde (21,5 - 23,53 m, 5660 - 11560 Jahre v.h.). Die sedimentologische Entwicklung verläuft ruhig, und die allochthone Zufuhr befindet sich auf niedrigem Niveau. Nur im mittleren Teil des Unteren Atlantikum und des Boreal erscheinen Phasen mit erhöhtem klastischen Eintrag, die auf Umweltänderungen (Seespiegelschwankungen?) hinweisen. Die klastische Zufuhr steigt bis zur Basis des Präboreal allmählich an.

Im Dünnschliff erkennt man wenige Schluff- bis Feinsandkörner, die in der organischen Matrix „schwimmen“. Die Mudde ist nicht laminiert. Feine Partikel von Holzkohle kommen weiterhin vor. Diatomeen und andere in Opal ausgebildete Reste sind zunächst selten erhalten, und dann

<sup>2</sup> Wir danken Herrn von Glahn, der uns das Ergebnis seiner Umfrage im Dorf mitgeteilt hat.

nur, wenn sie grob gebaut sind. Im unteren Boreal beginnt abschnittsweise die Erhaltung der zarteren Formen: hier überwiegen die Chrysophyceen-Zysten und Fäden planktischer Diatomeen die epiphytischen pennaten Formen bei weitem. Im unteren Boreal dominieren die limnischen organischen über die landbürtigen Reste.

Jüngere Tundrenzeit (23,53-23,76 m)

Die Serie aus 23 cm sandiger bräunlich-grauer schichtungsloser Mudde stammt aus der Jüngeren Tundrenzeit (im Folgenden: JT, 11.560-12.700 J.v.h.). Die Mudde enthält vor allem im oberen und im unteren Abschnitt reichlich große Partikel terrestrischer Pflanzen. In der durchweg nicht klassierten Sandfraktion finden sich besonders im oberen Abschnitt mittlere bis grobe Körner. Der Anteil an Feinschluff und Ton nimmt zur Basis zu, wo andererseits auch wieder gröbere Sandkörner auftreten.

An der dreigeteilten Abfolge am Ende der JT interessiert besonders der rasche Übergang zum Holozän, der sich auch im Glühverlustdiagramm zeigt. Im Dünnschliff erkennt man vom Liegenden zum Hangenden eine pulsartige Entwicklung, die mangels Jahresschichtung in mm-Schichtmächtigkeit beschrieben wird. Das Ende der erosiven Bedingungen, wie sie die JT charakterisieren, erfolgt innerhalb 1-2 mm. Nach einem 5 mm mächtigen Übergang wird eine feinstkörnige, strukturlose organische Matrix abgesetzt, in der wenige fein- bis mittelschluffige, und sehr vereinzelt grobschluffige Quarzkörner schwimmen (a). Nach 23 mm erfolgt erneut Erosion, die sich in klastischer Zufuhr widerspiegelt, was sich in einem 5-7 mm mächtigen Horizont (b) zeigt, der feinsandig beginnt. Das vorige Niveau geringerer allochtoner Zufuhr wird erst nach den folgenden 40-50 mm wieder erreicht.

Nach der Pollenanalyse handelt es sich bei dem sehr schluffarmen Abschnitt (a) um die Friesland-Phase, die in laminierten Profilen anderer Seen (MERKT & MÜLLER 1997) etwas mehr als 100 Jahre anhält, beim folgenden Abschnitt (b) um die Rammelbeek-Phase, die etwa 150 Jahre dauert und über insgesamt etwa 400 Jahre ins obere Präboreal überleitet. Dabei ist bemerkenswert, daß zwar das Schließen der Vegetationsdecke am Ende der Jüngeren Dryas mit ihrer fast offenen Tundra als Voraussetzung für den Abbruch der starken klastischen Zufuhr in den See angesehen wird (Friesland-Phase). Das kann aber nicht die alleinige Ursache für den Abbruch sein, wie das erneute Einsetzen der Erosion zeigt (Rammelbeek-Phase und danach), die eine nächste Klimaänderung mit mehr Niederschlag nahelegt, die in den Seesedimenten ihren Ausdruck trotz der inzwischen geschlossenen (Laub-Urwald-) Vegetation hinterlassen hat. In diesem Zusammenhang ist für die vorangegangene Friesland-Phase mit ihrer zu Beginn fast baumlosen Gräser-Kräuter-Vegetation ein Extrem-Klima anzunehmen, das beinahe keine Erosion erlaubte. Man muß sich bei der am Übergang von der JT zum Holozän erforderlichen Umstellung des Klimasystems einen sehr kontrastarmen Witterungsverlauf ohne starke Wind- und Niederschlag-Ereignisse vorstellen.

Alleröd (23.75-24.04 m)

Der Übergang vom Alleröd zur JT vollzieht sich innerhalb kürzester Zeit, was vor allem am abrupten Einsetzen sandiger Schichten zu Beginn der JT erkennbar ist. Die Dauer des Umschlages wird auf weniger als 50 Jahre geschätzt. Auch die groben, allochthonen pflanzlichen Partikel nehmen stark ab. Unter den mäßig häufigen Diatomeen im Alleröd fällt das Vorherrschen der planktischen Melosiren auf; lagenweise findet man in Abschnitten mit schluffigen Einstreuungen neben pflanzlichen Makroresten auch pennate, epiphytische Formen, darunter große Pinnularien. Diese Indizien sprechen für einen tiefen, ruhigen See in einem Kiefern-Birken-Urwald mit einem windarmen Klima ohne extreme Niederschläge.

Die ursprünglich vorhandene Schichtung ist weitestgehend zerstört; lagig angeordnete Schluffstreifen, gelegentlich noch erhaltene Chrysophyceen-Lagen belegen dies. Die hier ganz platt gedrückten Gehäuse der agglutinierenden Thecamöben weisen auf die erhebliche Setzung hin, die eine bessere Schichtung vortäuscht. Nahe der Basis des Alleröds ist eine - grobe, etwa 90 Jahre umfassende - Jahresschichtung des Typs erhalten, wie sie unten vom Bölling beschrieben wird: die charakteristische Ton-Sublamine ist erkennbar. Die Zunahme des Aschegehaltes (vgl. Glühverlustanalyse) geht also vorwiegend auf den höheren Tongehalt zurück. Die Warven sind nicht exakt zu zählen, da die Sublaminae nicht immer klar gegeneinander abzugrenzen sind.

Das Aussetzen der Lamination im unteren Alleröd, einer Periode, während der in anderen Seen sich eine beginnende Jahresschichtung eher stabilisiert, ist ungewöhnlich.

#### Ältere Tundrenzeit (24.04-24.06 m)

Die das Alleröd vom Bölling trennende Ältere Tundrenzeit (ÄT) ist nicht durch Dünnschliffe erfaßt. Die ÄT dauert nur etwa 140 Jahre und ist im Wollingster See kaum mehr als 15 cm mächtig.

#### Bölling (24.06 - 24.34 m)

Der 28 cm mächtige Sapropel ist durchgehend laminiert. Die Jahresschichtung folgt dem unten beschriebenen Jahresmodell, an dem eine aus Einzelkristallen aufgebaute, ausgeprägte Vivianit-Lage bemerkenswert ist, weil Vivianit gewöhnlich intrasedimentär gefällt wird und dann diffus verteilt vorliegt. In den böllingzeitlichen Sedimenten des Wollingster Sees bildet sich Vivianit meist am Ende der mächtigsten Sublamine, die oft mit planktischen Diatomeen beginnt, jedoch hauptsächlich aus größeren Silikaten und pflanzlichen Partikeln besteht und höchstwahrscheinlich im Herbst/Winter abgelagert wird. Die Vivianit-Lage stellt also wie in einigen heutigen finnischen Seen die Winterschicht dar. Auf die Vivianit-Lage folgt eine helle, fast strukturlose dünne Sublamine, gegen deren Ende Chrysophyceen-Zysten wie an Schnüren aufgereiht (gewöhnlich Spät-Winter) liegen. Diese Sublamine enthält Ton neben organischer Matrix (Winter-Ruhe unter Eisbedeckung und Schneeschmelze?). Die Tonlage ist leicht zu erkennen und als Kriterium zum Zählen verwendbar. Darauf folgt wieder die mächtige Sublamine aus Klastika und org. Detritus (s.o.). Das vorgestellte Jahresschichten-Schema variiert häufig, was angesichts der unruhigen spätglazialen Klimaverhältnisse normal ist.

Innerhalb der durch die Pollenanalyse festgestellten Grenzen wurden  $250 \pm 20$  Jahresschichten gezählt. Diese Zahl ist im Vergleich mit den Ergebnissen aus den Eifelmaaren (frdl. mündl. Mitt. LITT) um etwa 100 Jahre zu hoch, was an einer differierenden pollenanalytischen Grenzziehung liegen könnte, die gegenseitig abgeglichen werden sollte. Jedenfalls enthält der Wollingster See das bisher beste norddeutsche Profil für den Abschnitt zwischen dem unteren Alleröd und dem Meiendorf.

#### Älteste Tundrenzeit (24.34-24.39 m)

Das rauhe Klima der Ältesten Tundrenzeit spiegelt sich in den Sedimenten wider: mit scharfem Übergang treten dickere Fein-Mittelsandlagen auf, mit großen Pflanzenresten aus dem Flachwasserbereich, benthischen Diatomeen, Vivianitnestern sowie groben Bioturbationsspuren. Ganz vereinzelt finden sich Kalzitkörner. Daneben gibt es dicke Lagen von planktischen Diatomeen (zentrale, vor allem pennate Formen) und sogar feine Lamination.

### Meiendorf (24.39-24.51 m)

Der Abschnitt ist grob laminiert: Sand- bis Schlufflagen sind gradiert geschichtet und wenig bioturbirt. Diatomeen und Chrysophyceen treten reichlich auf. Holzkohlepartikel sind lagenweise häufig. Vivianitbutzen lassen, vom Klima wie von der Trophie her gesehen, auf eher lebensfreundliche Verhältnisse schließen. Ansammlungen großer Pflanzenreste belegen gelegentlichen Transport aus dem Flachwasser. Erwähnenswert sind Kalkkristalle, die authigen sind. Neben den klastischen Horizonten kommen mm-dicke Lagen planktischer Diatomeen vor, die episodische, massive Diatomeenblüten widerspiegeln.

### Pleniglazial (ab 24.51 m)

Zunächst setzen sich die oben beschriebenen Verhältnisse fort; allerdings treten hoch sortierte Grobsandlagen auf, die ausschließlich aus Quarz bestehen. Die einzelnen Lagen sind gröber als im Hangenden. In den grobklastischen Schichten kommen kohlige Partikel teilweise massenhaft (s.u.) vor.

Ab 24.71 m enden zunächst die Diatomeenlagen aus Massenblüten, die Bioturbation nimmt zum Liegenden zu und die Güte der Schichtung ab. Mit Ausnahme vereinzelter großer benthischer Formen verschwinden Diatomeen allmählich ganz aus den Schichten, die mehr und mehr die Kennzeichen von Sedimenten eines oligotrophen arktischen Sees annehmen: grobe Pflanzen- und häufige Insektenreste, Holzkohle und vergelte Partikel organischer Substanz füllen die Räume zwischen meist nun schlecht sortierten Sandkörnern auf.

Unterhalb von 25.5 m erscheint abschnittsweise wieder feine Schichtung, die sich wie die klassischen klastischen (de Geer-)Warven weitgehend aus gradierten Silikatkörnern aufbaut und teilweise Jahresschichtung sein dürfte. Diatomeen sind lagenweise wieder häufig. Die massenhaft auftretenden, sehr feinen, teilweise abgerollten kohligen Partikel sowie die Kalkkörner dürften vom Lauenburger Ton herzuleiten sein, aus dessen Material diese Schichten weitgehend aufgebaut sind. Das Florenspektrum (MÜLLER & KLEINMANN, in diesem Band) wie auch die relativ feine Körnung der Silikate belegen dies.

Dieser Sedimentationstyp setzt sich bis 28.3 m fort. Er besteht aus sterilen schluffigen bis tonigen Schichten, mit deutlichem Glimmer- und geringem Sandanteil aus Material des Lauenburger Tons, sowie einer durch Bioturbation gestörten, aber abschnittsweise erhaltenen Warvenschichtung.

Aus technischen Gründen wurde die Bohrung mit Sondierstangen vertieft, deren Bohrgut erheblich schlechter ist und sich für verlässliche Analysen nicht eignet. Die tonigen Schluffe aus aufgearbeitetem Lauenburger Ton mit Sandlagen setzten sich bis 30,52 m fort. Darunter folgte bis 31.40 m Schmelzwasser(?) - Sand ohne bindige Beimengung, der daher aus der Bohrerlut auslief. Die Bohrung wurde aus technischen Gründen abgebrochen.

### 3.3 Geochemie (Abb. 1)

In den Glühverlustkurven sind von rechts nach links die Prozentanteile an organischer Substanz, Kalk (schwarzes Feld) und Rest-Asche (gepunktetes Feld) aufgetragen, die als Gewichtsverluste der bei 105° C getrockneten Proben nach Glühen bei 550° C und 870° C ermittelt worden sind. Das Glühverlustdiagramm stellt 3 wichtige geochemisch-sedimentologische Parameter zur Verfügung. Die Glühverlustanalyse ist kostengünstig, und sie löst das Profil zeitlich mehr als 10 mal höher auf als die geochemischen Analysen.

Die möglicherweise durch einen Bombenabwurf entstandene Durchmischung der jüngsten Sedimente spiegelt sich in den geochemischen Verhältnissen wider. Dabei legen die Gehalte von Ce und Y (untergeordnet auch V und  $TiO_2$ ) wie auch die palynologischen Analysen eine (gewaltsame) Aufarbeitung von spätglazialem Sediment nahe. Andererseits belegen die außergewöhnlich hohen Anfangskonzentrationen von Zink, Blei und Wolfram ein Ereignis, bei dem diese Elemente neu hinzugekommen sind. Die Gehalte an Schwefel (Stot) und Arsen, das Fe/Mn-Verhältnis und deren anschließendes Absinken weisen auf ein Defizit an Sauerstoff hin, das auf das plötzliche Ereignis folgte. Ein weiterer Sedimentkern (in Arbeit) wird klären, ob das gesamte zentrale Seebecken oder nur die Bohrstelle betroffen ist.

Die Geochemie der holozänen Mudden (16,5 - 23,5 m) ist beinahe ausschließlich durch das antagonistische Wechselspiel zwischen silikoklastischer Zufuhr und organischer Produktion bestimmt: Zr,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , Rb sowie  $SiO_2$  verlaufen praktisch parallel zueinander und zum Gang des Aschegehaltes der Glühverlustkurve. Das Abweichen der  $SiO_2$ -Kurve von den Kurven der vorgenannten Elemente im jüngeren Holozän legt die Zunahme des Quarzes aus Flugsand nahe, der offenbar an Feldspäten und Tonmineralen verarmt ist.

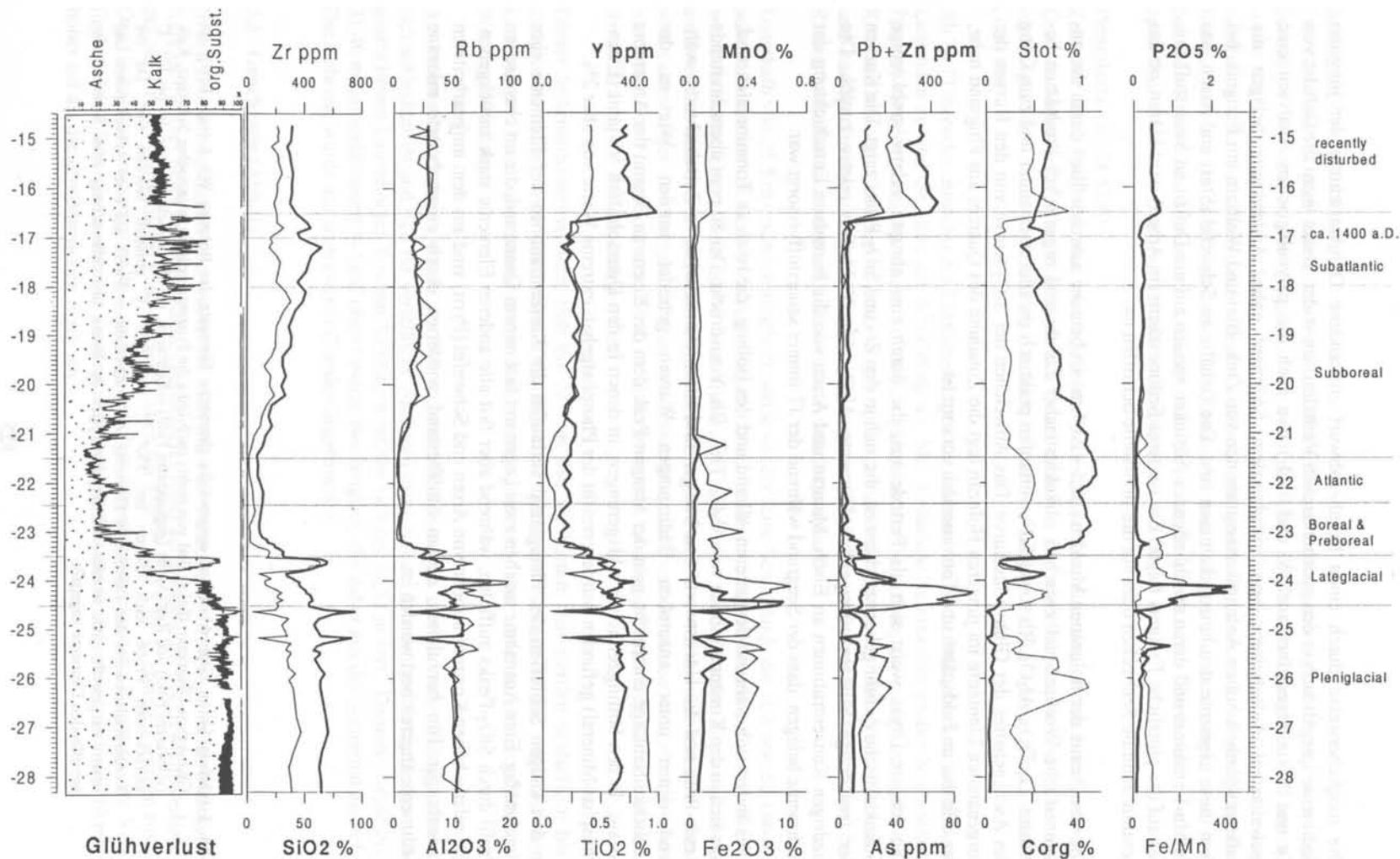
Die Jüngere Dryas weist sich als Periode aus, die durch eine abrupte, relativ grobkörnige silikoklastische Zufuhr gekennzeichnet ist, die sich in den Zr- und  $SiO_2$ -Peaks zeigt. Die Kurven der feinkörnige Silikate anzeigenden Elemente  $Al_2O_3$ , Rb, Y bleiben relativ zurück. Die niedrigen Konzentrationen an Eisen, Mangan und Arsen wie die bioturbate Entschichtung der Sedimente belegen, dass der Seegrund während der JT immer sauerstoffversorgt war.

Dies ändert sich während des unteren Alleröd und des Bölling, die reich an Tonmineralen sind, was sich in den Konzentrationen von  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , Rb, Y ausdrückt. Der 80 ppm überschreitende Arsen-Peak und die Höchstwerte von Mangan und Eisen charakterisieren Zeitabschnitte, während denen unter anaeroben Bedingungen Warven gebildet wurden. Wie es der Löslichkeitsabfolge entspricht, geht der Mangan-Peak dem des Eisens zu Beginn der Anaerobie voraus. In den böllingzeitlichen Ablagerungen, in denen in den Dünnschliffen Vivianit (Eisen-Phosphat-Mineral) gefunden wurde, erreicht der Phosphatgehalt extreme Werte von über 2%.

In den tonigen Schluffen des Pleniglazial verlaufen die Konzentrationen der Elemente eher gleichmäßig. Eine Ausnahme machen zwei Lagen mit fast reinem Quarzsand, die im chemischen Profil durch  $SiO_2$ -Peaks auffallen, während aber fast alle anderen Elemente stark zurückgehen. Die relativ hohen Konzentrationen von Arsen und Schwefel (Pyrit) sind aus dem aufgearbeiteten Lauenburger Ton herzuleiten, dessen Stoffbestand wiederum durch eingearbeitete miozäne Sedimente angereichert worden ist.



**Abb. 1** (nächste Seite): Glühverlust und ausgewählte chemische Elemente der Bohrung Wo 1 (vgl. Text). Im Glühverlust-Diagramm (links) sind von rechts nach links die Prozentanteile an organischer Substanz, Kalk (schwarzes Feld) und Rest-Asche (gepunktetes Feld) aufgetragen, die als Gewichtsverluste der bei  $105^\circ C$  getrockneten Probe nach Glühen bei  $550^\circ C$  und  $870^\circ C$  ermittelt worden sind. Da die Konzentrationswerte der chemischen Elemente und Verbindungen jeweils auf zwei Achsen (oben und unten) dargestellt sind, wurden die Beschriftungen in Breite und Schwärzung dem Linienstil der betreffenden Elemente angepaßt.



## 4 Danksagung

Die Untersuchungen wurden durch Zuwendungen aus Mitteln des Nationalen Klimaprogrammes (BMB+F, Kennzeichen 07 VKV 01A/1) und des Schwerpunktprogrammes: "Globaler Wandel der Geo- Biosphäre während der letzten 15.000 Jahre" der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Me 1371/1-2) ermöglicht, wofür wir danken. Wir sind H. Müller für die palynologischen Analysen, U. Lade und E. Rachor für Diskussionen; allen Mitarbeitern und Helfern im Gelände und in den Labors zu Dank verpflichtet.

## 5 Literatur

- CHRISTIANSEN, A.E., GENDZWILL, D.J. & MENELEY, W.A. (1982): Howe lake: a hydrodynamic blowout structure. - *Can. J. Earth Sci.* 19: 1122-1139, 15 figs.
- DE GANS, W. (1982): Location, Age and Origin of Pingo Remnants in the Drentsche Aa Valley Area (The Netherlands). - *Geol. en Mijnbouw* 61: 147-158.
- LADE, U. (1974): Der Wollingster See - Ein Beitrag zum Alter und zur Entstehung. - *Jb. der Männer vom Morgenstern* 54: 9-32, 6 Abb.; Bremen.
- LADE, U. (1978): Untersuchungen an quartären Formen und Ablagerungen in der Bremervörder-Wesermünder Geest (Elbe-Weser-Dreieck). - Unveröff. Diss., 186 S., 45 Abb., 8 Taf., 1 Kt.; Würzburg.
- LADE, U. (1979): Neuere Untersuchungen am Wollingster See. - *Jb. der Männer vom Morgenstern* 58: 11-26, 2 Abb.; Bremen.
- LUNDBECK, J. (1934): Über den primär oligotrophen Seetyp und den Wollingster See als dessen mitteleuropäischem Vertreter. - *Arch. Hydrobiol.* 27: 221-250; Stuttgart.
- LUNDBECK, J. (1938): Das Werden und Vergehen der nordwestdeutschen Seen. - *Geol. Meere u. Binnengewässer* 2: 22-61; Berlin.
- MERKT, J. & MÜLLER, H. (1997): Absolute chronology of the Holocene and the Lateglacial from stacked sections of varved lake sediments from north Germany.- 7th International Symposium on Palaeolimnology, Abstract Volume, Würzburger Geogr. Manuskri. 41: 137-138; Würzburg.
- MÜLLER, H. & KLEINMANN, A. (in diesem Band): Palynologische Untersuchung eines Sedimentprofils aus dem Wollingster See. - *Mitt. AG Geobotanik in Schleswig-Holstein und Hamburg.*

*Anschrift der Verfasser:* Dr. J. Merkt, Dr. A. Kleinmann  
Niedersächs. Landesamt für Bodenforschung  
Stilleweg 2  
D-30655 Hannover