



## **Bericht zu den biostratigraphischen Untersuchungen von Proben aus der Forschungsbohrung Rohrloh 2022**

### **Inhalt**

Einleitung.....	2
Probenaufbereitung.....	4
Methodik.....	5
Der organische Inhalt.....	6
Ergebnisse.....	7
Pollenzone 1.....	8
Pollenzone 2.....	10
Pollenzone 3.....	10
Diskussion.....	12
Stratigraphie.....	12
Paläoökologie.....	17
Zusammenfassung.....	20
Literatur.....	20



## Einleitung

In diesem Bericht wird eine biostratigraphische Analyse basierend auf einer palynologischen Untersuchung von Pollen, Sporen und Algen aus präquartären Abschnitten lakustriner Sedimente aus dem Rohrloh-Maarsee vorgestellt. Dieses Maar liegt südöstlich der Kreisstadt Selb im Fichtelgebirge direkt an der deutsch/tschechischen Grenze und rund zwei Kilometer südwestlich zweier Maare auf der tschechischen Seite bei Libá (Liebenstein) (Ztraceny rybník-Maar, Bažina Maar). In diesem Gebiet am südwestlichen Rand des Cheb-Beckens im westlichen Teil des Egergrabens wurden in den letzten Jahren einige quartäre vulkanische Strukturen mit einem Alter bis zu 300.000 Jahren entdeckt, was zu einer intensiven geophysikalischen Erkundung des Gebietes und zur Entdeckung weiterer vulkanischer Strukturen führte. In einigen dieser potentiellen ehemaligen Maare wurden in den letzten Jahren durch das Bayerische Landesamt für Umwelt Tiefbohrungen durchgeführt. Im Zuge einer Forschungsbohrung im Oktober 2020 wurde in der Maar-Struktur bei Bärnau (Landkreis Tirschenreuth, Oberpfalz, Bayern) die komplette Abfolge von Seesedimenten erbohrt, die durch eine palynologische Bearbeitung biostratigraphisch in das Unter-Miozän (Burdigalium) eingestuft werden konnte. In einer weiteren Bohrung wurde nun im Jahr 2022 im Rohrloh-Maar eine weitere, 70 m tiefe Bohrung abgeteuft, bei der die Basis der Seesedimente allerdings nicht ganz erreicht wurde. Dennoch erlaubt die erbohrte Abfolge von lakustrinen Sedimenten eine detaillierte Untersuchung der Mikroflora, mit deren Hilfe eine biostratigraphische Ansprache ermöglicht wird und somit das Alter der Sedimente erhalten werden kann.

Eine palynologische Bearbeitung konzentriert sich rein auf die pflanzlichen Mikrofossilien, die im organischen Rückstand der Sedimente enthalten sind. Dabei handelt es sich vor allem um Pollen und Sporen von Landpflanzen sowie um weitere Mikrofossilien wie Algen, die im aquatischen Milieu eines Ablagerungsraumes gelebt haben. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung und hohen Produktion können Palynomorphen als Leitfossilien vom Paläozoikum bis zum jüngsten Holozän genutzt werden und ermöglichen somit eine relativ genaue zeitliche Einordnung von Sediment(locker)gesteinen.

Eine stratigraphische Ansprache von känozoischen Sedimenten und eine Unterscheidung zwischen quartären, neogenen und paläogenen Abfolgen mit Hilfe von Palynomorphen ist eine sehr zuverlässige Methode, denn das känozoische Klima war deutlichen Schwankungen unterworfen. Dies hatte zur Folge, dass es kontinuierlich zu Änderungen innerhalb der Vegetationszusammensetzung kam und dadurch die Serien und Systeme des Känozoikums jeweils durch eine charakteristische Vegetation gekennzeichnet sind. Diese spiegelt sich entsprechend im Pollenniederschlag wider, der damit stratigraphisch verwertbar ist.



Bei den Seesedimenten aus dem Rohrloh-Maar konnte aus regionalgeologischer Sicht ein neogenes bis quartäres Alter erwartet werden. Für die stratigraphische Einstufung von Sedimenten im Neogen ist jedoch bedeutend, dass insbesondere ab dem Oberoligozän die phylogenetische Entwicklung der Pflanzen nahezu abgeschlossen war. Dies hat daher zur Folge, dass die Pollenspektren ab dem Oligozän zunehmend durch ähnliche Mikroflorengesellschaften charakterisiert sind (von der Brelie 1967), sodass eine rein qualitative Ansprache des Inhaltes an Pollen und Sporen von Proben aus dieser Zeit kein eindeutiges Alter liefern kann. Aus diesem Grund muss eine quantitative Analyse erfolgen, da die neogenen Pollenspektren deutliche Änderungen in der quantitativen Zusammensetzung zeigen. Somit konnte von der Brelie (1967) schon frühzeitig den Zeitabschnitt zwischen dem Oberoligozän (Chattium) und dem Ende des Pliozäns in verschiedene mikrofloristische Abschnitte gliedern, die jeweils durch charakteristische Verbreitungsmaxima und –minima relevanter Pollenarten gekennzeichnet sind. Auch Piwocki & Ziemińska-Tworzydło (1997) berücksichtigen in ihrer palynostratigraphischen Gliederung des polnischen Neogens quantitative Änderungen in der Zusammensetzung der Palynomorphen-Gemeinschaften.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung wurden insgesamt 25 Proben aus der Tiefbohrung Rohrloh 2022 aufbereitet und quantitativ nach Pollen und Sporen untersucht. Dabei wurde die gesamte Bohrung zwischen 70 und 12 m Tiefe erfasst und ein Probenabstand von 2 bis 3 m gewählt. Dies ermöglicht einen Überblick über die Vegetationsentwicklung während der Ablagerungszeit der Seesedimente und eine stratigraphische Ansprache. Auch erste Aussagen zur Paläoökologie und zum Paläoklima sind möglich.

Auf die Untersuchung von Proben aus Sedimenten in den obersten 12 m der Bohrung wurde verzichtet, da in 11,90 m Tiefe ein deutlicher Wechsel in den Sedimenten erkennbar war und dort eine scharfe Grenze zwischen den dunklen Seesedimenten und grauen, ungeschichteten Sedimenten im oberen Teil gibt. Es handelt sich bei diesen wahrscheinlich um eine quartäre Rutschmasse, die möglicherweise auch zur Abtragung oder Umlagerung der jüngsten Seesedimente beigetragen hat, sodass die Endphase der Seeentwicklung im Kern nicht mehr erfasst werden kann.

Palynologische Untersuchungen von einigen Proben aus der potentiellen quartären Rutschmasse, die von Martina Stebich (Forschungsinstitut Senckenberg, Weimar) vorgenommen wurden, haben allerdings ergeben, dass die Pollenspektren in den Proben aus den Seesedimenten und der Rutschung weitgehend identisch sind, sodass davon ausgegangen werden kann, dass in dieser Rutschmasse Komponenten der älteren Seesedimente enthalten sind bzw. ältere Seesedimente in der Rutschmasse umgelagert wurden.

Um einen Einblick in die jüngsten Sedimente des Sees zu bekommen, werden innerhalb dieses Berichtes auch die Ergebnisse von palynologischen Untersuchungen einiger Proben aus einer 10 m tiefen Testbohrung im Rohrloh-Maar mit berücksichtigt,



die schon im Rahmen meines Gutachtens über die Seesedimente aus dem Bärnau-Maar enthalten sind (Lenz 2021). Die Liste der untersuchten Proben aus beiden Bohrungen im Rohrloh-Maar ist in Tab. 1 zu finden.

<b>Forschungsbohrung Rohrloh 2022</b>			<b>Testbohrung Rohrloh (Lenz 2021)</b>	
<b>Nr.</b>	<b>Probentiefe (in m)</b>	<b>Probenbezeichnung im Text</b>	<b>Nr.</b>	<b>Probentiefe (in m)</b>
1	12,58 – 12,60	12,59	1	0,85
2	14,58 – 14,60	14,59	2	2,25
3	17,38 – 17,40	17,39	3	3,00
4	20,18 – 20,20	20,19	4	3,85
5	23,38 – 23,39	23,39	5	5,00
6	25,18 – 25,20	25,19	6	6,05
7	27,18 – 27,20	27,19	7	6,90
8	29,18 – 29,20	29,19	8	8,95
9	31,18 – 31,20	31,19		
10	33,18 – 33,20	33,19		
11	35,18 – 35,20	35,19		
12	39,19 - 39,20	39,19		
13	41,58 – 41,60	41,59		
14	43,38 – 43,40	43,39		
15	45,38 – 45,40	45,39		
16	47,18 – 47,20	47,19		
17	49,18 – 49,20	49,19		
18	51,18 – 51,20	51,19		
19	53,18 – 53,20	53,19		
20	55,78 – 55,79	55,79		
21	57,18 – 57,20	57,19		
22	59,18 – 59,20	59,19		
23	63,38 – 63,40	63,39		
24	69,50 – 69,52	69,51		
25	69,98 – 70,00	69,99		

*Tab. 1: Liste der untersuchten Proben aus der Forschungsbohrung 2022 sowie der Testbohrung aus dem Rohrloh-Maar*

## Probenaufbereitung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die Proben aus der Forschungsbohrung im Flusssäurelabor der TU Darmstadt (Angewandte Geowissenschaften) aufbereitet, während die Proben aus der Testbohrung bereits im aufbereiteten Zustand zur



Verfügung gestellt wurden. Diese Proben wurden im Labor des Senckenberg Forschungsinstitutes Weimar (Martina Stebich) aufbereitet.

Für die Aufbereitung der Proben aus der Forschungsbohrung wurde die innovative und immer noch neuartige Aufbereitung mit Hilfe einer Mikrowelle genutzt. Verwendet wurde dabei das MARS-VI-System der CEM Corporation. Dieses System ermöglicht eine standardisierte Einstellung bestimmter Parameter, wie zum Beispiel der verwendeten Temperatur. Alle verwendeten Chemikalien wurden über Dispenser mit fester ml-Einstellung verteilt, die somit nur die Zugabe bestimmter Chemikalienmengen in die Probengefäße ermöglichte. Dies gewährleistet eine einheitliche und vergleichbare Probenbearbeitung.

Da es sich um Locker- bis geringverfestigte Sedimente handelt, die erbohrt wurden, wurde auf die zeitaufwändige und nicht ungefährliche Behandlung mit Flußsäure (HF) verzichtet. Die Proben wurden daher nur unter Verwendung von Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) oxidiert und durch ein  $10\ \mu m$ -Maschensieb gesiebt. Anschließend wurden die Rückstände mit 5% Kaliumhydroxid (KOH)-Lösung vermischt und 10 Minuten im MARS VI-System auf  $80\ ^\circ C$  erhitzt und ein weiteres Mal durch ein  $10\ \mu m$  Maschensieb gesiebt. Da auf die HF-Behandlung verzichtet wurde, war ein hoher Anteil an nicht-organischem, klastischem Material im Rückstand enthalten, der durch mehrfaches Dekantieren vom organischen Material abgetrennt wurde. Am Ende der Probenverarbeitung wurde der verbleibende Rückstand mit einer kleinen Menge 35%iger Salzsäure (HCl) versehen, um verbleibende Fluoride zu lösen. Nach dem letzten Sieben wurden die Rückstände in Gläschen überführt und 2 Tropfen 35% HCl hinzugefügt, um eine leicht saure Umgebung zu schaffen, die einen Pilzbefall verhindert. Für jede Probe wurden permanente Objektträger hergestellt, indem der Rückstand mit Glycerin-Gelantine vermischt wurde.

## Methodik

Nach der chemischen Aufbereitung der Proben im Labor wurden die einzelnen Taxa an Pollen, Sporen und Algen unter dem Lichtmikroskop bei 400- bis 600-facher Vergrößerung zur Katalogisierung und Identifizierung qualitativ und quantitativ erfasst, dokumentiert und gegebenenfalls fotografiert.

Die fossilen Palynomorphen wurden anhand ihrer morphologischen Merkmale wie der Apertur, der Pollenwandstruktur, dem Ornamentations-Typ und der Größe bestimmt. Als Bestimmungsliteratur dienten vor allem die morphologisch-taxonomischen Arbeiten von Ziembińska-Tworzydło (1974), Thiele-Pfeiffer (1980), Stuchlik et al. (2001, 2002, 2009, 2014). Pro Probe wurden ca. 200 Pollen und Sporen ausgezählt. Damit können alle relevanten und regelmäßig vorkommenden Palynomorphen in einer Probe erfasst werden, so dass eine stratigraphische Ansprache möglich ist. Die prozentualen Anteile der einzelnen Taxa am Gesamtspektrum sind in den Pollendiagrammen (Abb. 1) dargestellt.



Für eine robuste statistische Analyse ist die Zahl der ausgezählten Palynomorphen von 200 Körnern zwar zu gering, aus Zeitgründen musste aber auf eine höhere Zahl bei der Auszählung verzichtet werden. Dennoch ergeben auch die statistischen Analysen deutliche Trends, die sich auch bei einer quantitativen Analyse mit einer höheren Zahl an Palynomorphen nicht mehr grundsätzlich ändern werden.

Für die Analysen wurden die Rohdaten von 32 Pollen/Sporen-Arten genutzt, die mit einer Häufigkeit von mindestens 1% in zumindest einer der Proben auftreten. Für die statistische Analyse wurde zunächst die sogenannte Wisconsin-Doppelstandardisierung der Rohdaten durchgeführt. Bei dieser Normierung werden die Rohdatenwerte jedes Elements (hier Taxon) durch seinen Maximalwert über alle Proben hinweg geteilt (*species maximum standardisation*). Danach werden diese errechneten Werte durch die Summe dieser Werte in der jeweiligen Probe geteilt (*sample total standardisation*). Dadurch wird der unterschiedliche Einfluss von seltenen und häufigen Taxa auf das Ergebnis der statistischen Analyse ausgeglichen. Eine Zonierung des Pollendiagramms der Tiefbohrung wurde mit Hilfe der Software PAST 4.12 durchgeführt. Dazu wurde eine hierarchische Cluster-Analyse mit Hilfe der *Unweighted Pair Group Average Method* (UPGMA) unter Verwendung der Bray-Curtis-Unähnlichkeit als Abstandsmaß genutzt (Abb. 2).

Zur objektiven Veranschaulichung der Unterschiede und Ähnlichkeiten zwischen den Palynomorphen-Gesellschaften der einzelnen Pollenzonen wurde schließlich die Nicht-metrische Multidimensionale Skalierung (NMDS) angewandt (Abb. 3). Dies ist ein Ordinationsverfahren, bei der die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit von Objekten in einer zweidimensionalen graphischen Darstellung präsentiert wird. In dieser Analyse sind alle Proben, die einen ähnlichen Pollen/Sporen-Inhalt haben, eng zusammen geplottet. Je größer der Abstand zwischen den Proben, desto größer ist der Unterschied zwischen den Pollengesellschaften. Zusätzlich sind auch die Pollen- und Sporentaxa bzw. die zugehörigen Pflanzenfamilien und -gattungen gemeinsam mit den Proben geplottet. Dadurch wird deutlich, in welchen Proben die jeweiligen Palynomorphen häufig oder selten vorkommen. Auch hier gilt, je näher die Pflanzenfamilie bzw. -gattung zu einer Probe geplottet ist, desto höher ist dort ihr Anteil am Pollenspektrum. Je größer der Abstand zu einer Probe ist, desto seltener tritt die Pflanze im Pollenspektrum auf.

## Der organische Inhalt

Grundsätzlich sind die Proben aus den Bohrungen aus dem Rohrloh-Maar von hervorragender Qualität. Auffällig ist die sehr gute Erhaltung der Palynomorphen, die zeigt, dass es nach deren Ablagerung zu keiner größeren Umlagerung gekommen ist, die zu einer Beschädigung oder Fragmentierung der Mikrofossilien geführt hätte. Die erstklassige Erhaltung der Mikroflora liegt vor allem daran, dass sich die Sedimente in Maarseen hervorragend für die Bewahrung paläoökologischer und damit auch



stratigraphischer Informationen eignen, da die Kombination einer relativ geringen Größe eines Maarsees mit einer relativ großen Wassertiefe zu anoxischen Bedingungen in den tieferen Wasserschichten führt.

Lediglich die beiden Proben aus der Basis der Forschungsbohrung in 69,51 m und 69,99 m Tiefe haben sich als vollkommen steril erwiesen. Allerdings zeichnen sich die Sedimente unterhalb von 67,50 m in der Bohrung durch eine deutliche Rotfärbung aus. Dadurch unterscheiden sich diese Sedimente deutlich von den dunklen, organisch-reichen tonigen Sedimenten oberhalb von 67,50 m. Hier ist somit wahrscheinlich der Übergang zwischen der holomiktischen und der meromiktischen See-Phase des Maar-Sees erfasst worden. In der holomiktischen See-Phase kommt es noch ein- bis mehrmals im Jahr zur Vollzirkulation des Seewassers, was entsprechend auch zur Oxidation und somit zur Auflösung der möglicherweise abgelagerten Palynomorphen geführt haben kann. Erst mit dem Übergang zur Meromixis entsteht dann ein stehendes Gewässer, bei der Wasserzirkulation nicht mehr den Grund des Sees erreicht und sich sauerstofffreie Verhältnisse im Tiefwasser ausbilden und somit günstige Erhaltungsbedingungen für die Palynomorphen entstehen. Dementsprechend sind die untersuchten Proben ab einer Tiefe von 63,39 m dann auch durch eine diverse Palynoflora gekennzeichnet.

## Ergebnisse

Die quantitative Verteilung der 23 höffigen Proben aus der Tiefbohrung und der 8 Proben aus der Testbohrung sind im Pollendiagramm (Abb. 1) dargestellt. Mit Hilfe einer Cluster-Analyse (Abb. 2) konnte das Pollendiagramm in die drei Zonen 1 bis 3 gegliedert werden, die sich jeweils durch eine charakteristische Palynomorphen-Gesellschaft auszeichnen, die sich von der der anderen beiden Zonen deutlich unterscheidet. Bis auf die oberste Probe aus der Testbohrung wurden die sieben anderen Proben dieser Bohrung zu einer gemeinsamen Zone zusammengefasst. Da es sich um Proben vom Top der lakustrinen Sedimente handelt, die in der Testbohrung erfasst wurden, ist davon auszugehen, dass es sich um die jüngsten Sedimente innerhalb der lakustrinen Abfolge handelt. Diese sollten somit ähnlichen Alters sein wie die Proben vom Top der Abfolge in der Tiefbohrung. Da es in der Tat deutliche Ähnlichkeiten zwischen den Proben aus der Testbohrung und den Proben aus der obersten Zone in der Tiefbohrung gibt (siehe unten), wurden beide Pollenzonen nicht als eigene Zonen voneinander getrennt, sondern als Zonen 3a und 3b lediglich in Subzonen unterschieden.

Im Folgenden werden die palynologischen Befunde der drei Zonen genauer beschrieben.

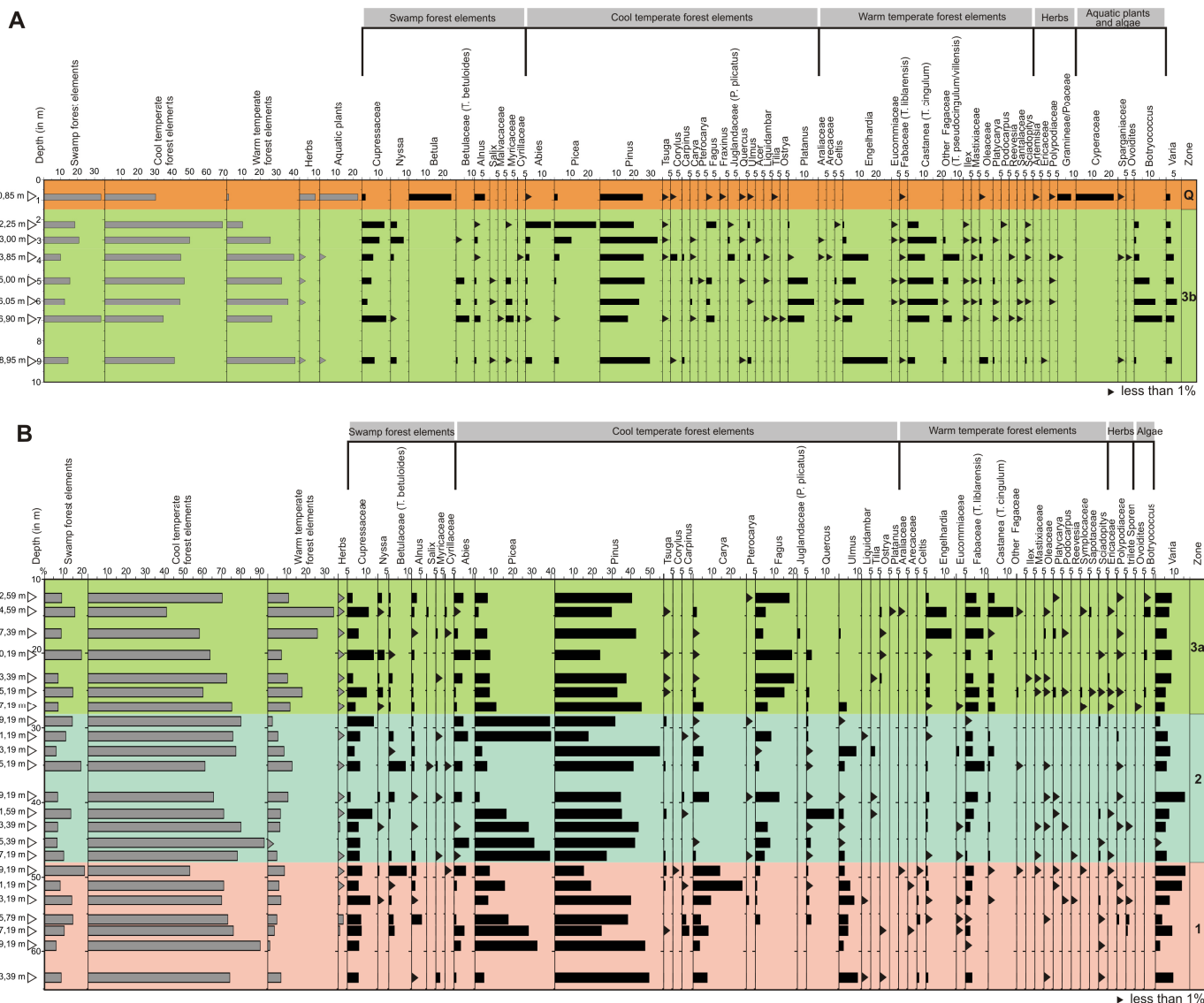


Abb. 1: Pollendiagramme für den Maarsee von Rohrlöh. A) Testbohrung Rohrlöh, B) Forschungsbohrung Rohrlöh

### Pollenzone 1

Die sieben unteren Proben aus der Tiefbohrung zwischen 63,39 m und 47,19 m unterscheiden sich nach der Cluster-Analyse (Abb. 2) deutlich von den übrigen Proben aus der Forschungsbohrung und bilden die Pollenzone 1. In dieser Zone dominieren wie im gesamten Profil die Pollen der Nadelbäume. Insbesondere der Pollen von *Pinus* (Kiefer, Abb. 4A-C) ist stark vertreten und erreicht in der untersten Probe 49,4%. Zum Top der Zone nimmt die Zahl der *Pinus*-Pollen allerdings stetig ab. Auch wenn die Pollen immer noch häufig sind, werden nur noch 15,3% erreicht. Auch der Pollen von *Picea* (Fichte, Abb. 4D-E) erreicht maximal 32,9%, ist aber durch stark schwankende Häufigkeitswerte gekennzeichnet.



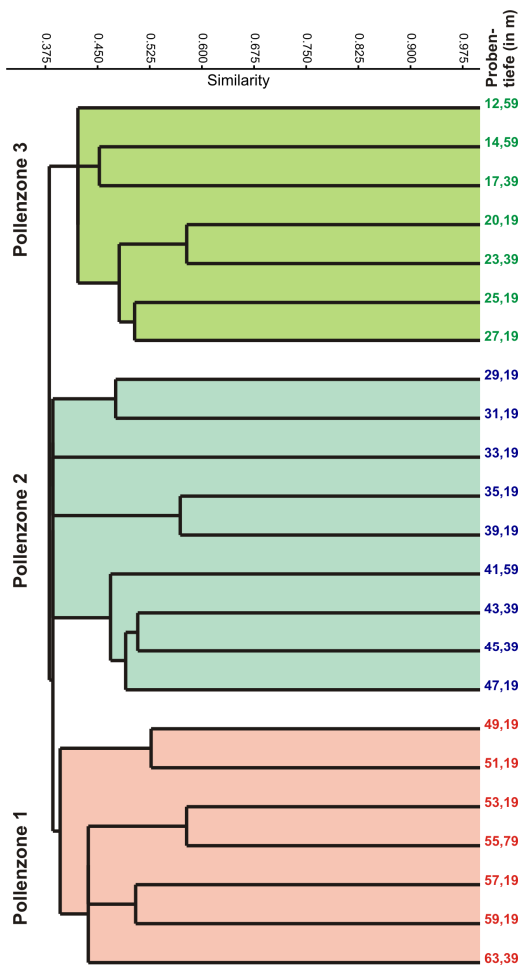


Abb. 2: Cluster-Analyse von 23 Proben aus der Forschungsbohrung im Rohrloch-Maar

Das markanteste Merkmal dieser Pollenzone ist jedoch das hohe Vorkommen von Pollen von *Carya* (Hickory, Abb. 5Q). Diese Gattung aus der Familie der Walnussgewächse (Juglandaceae) ist heute in natürlichen Beständen nur in Nordamerika und Ostasien vorhanden, ist aber ein wichtiges Element in tertiären Floren Mitteleuropas. Die Pollen erreichen in 51,19 m Tiefe mit 25,9% ihren Maximalwert in der gesamten untersuchten Abfolge, sind auch in der Probe am Top der Zone mit 14,4% noch sehr häufig, bevor sie dann in der Pollenzone 2 deutlich zurückgehen und nur in einzelnen Proben noch höhere Werte erreichen. In Pollenzone 3 spielen sie dann keine Rolle mehr und treten nur noch sehr selten auf.

Eine ähnliche Häufigkeitsverteilung zeigen die Pollen der Ulmaceae (*Ulmus/Zelkova*, Ulmengewächse, Abb. 6A). In der untersten Probe erreichen die Pollen ihren Maximalwert von 10,1% und sind auch in den nachfolgenden Proben der Zone mit durchschnittlich 4,9% recht häufig vertreten. In Pollenzone 2 sinkt ihr Anteil auf durchschnittlich 2,2%, bevor in Pollenzone 3 die Pollen dann völlig verschwinden.

Erwähnenswert ist auch das Auftreten von triletten Sporen (Abb. 5A-C). Diese zeigen das

Auftreten von verschiedenen Farnen am Seeufer an. Zwar sind die Sporen nicht häufig in Pollenzone 1, kommen dort aber regelmäßig vor, während sie in den anderen Zonen dann verschwinden.

Weitere häufige Elemente in Pollenzone 1 sind die Pollen der Cupressaceae s. l. (Zypressengewächse, durchschnittlich 7,5%, Abb. 5D-F) und der Fabaceae (Hülsenfrüchtler, *Tricolpopollenites liblarensis/microhenrici*, durchschnittlich 2,5%, Abb. 6B-D). Regelmäßig kommen zudem in den oberen Proben der Pollenzone die Pollen von *Betula* (Birke, Abb. 5N-O), *Alnus* (Erle), *Carpinus* (Hainbuche), *Fagus* (Rotbuche, Abb. 6L-M) und *Quercus* (Eiche, Abb. 6P) vor.



## Pollenzone 2

Diese Pollenzone ist in der Tiefbohrung durch 9 Proben zwischen 47,19 m und 29,19 m Tiefe vertreten. In der Cluster-Analyse (Abb. 2) sind die Proben deutlich von den Proben der beiden anderen Zonen getrennt, so dass auch diese Zone wieder durch eine charakteristische Palynomorphen-Gesellschaft gekennzeichnet ist. Wie in Pollenzone 1 dominieren weiterhin die Pollen von *Pinus*. Die Kiefern-Pollen erreichen in 33,19 m Tiefe mit 55% ihren Maximalwert. Mit durchschnittlich 36,5% sind sie insgesamt häufiger als in Pollenzone 1. Im Vergleich zur Zone 1 sind auch die Pollen von *Picea* häufiger. Sie erreichen einen Maximalwert von 39,9% und einen Durchschnittswert von 23,1%. Allerdings sind auch hier, ähnlich wie in Zone 1, die stark schwankenden Werte dieser Pollen auffällig, denn zwischen 39,19 m und 33,19 m werden nur maximal 6,4 % erreicht. Zum Top der Zone steigen die Werte dann wieder stark an, bevor sie mit dem Übergang in Pollenzone 3 wieder deutlich zurückgehen.

Neben dem deutlichen Rückgang der Pollen von *Carya* ist in Pollenzone 2 der starke Anstieg von *Fagus*-Pollen bemerkenswert, die mit maximal 12,6% und durchschnittlich 4,8% auftreten. Diese Pollen, die als *Tricolporopollenites pseudocruciatus* angesprochen werden können, entsprechen nach Hochuli (1978) den Pollen der modern *Fagus sylvatica*.

Wie in Zone 1 sind auch die inaperturaten Pollen der Cupressaceae s.l. mit maximal 13,9% wieder stark vertreten. Als weitere Konifere tritt *Abies* (Tanne, Abb. 4F) auf, deren Pollen mit maximal 7,8% und durchschnittlich 3,3% vorkommen. Auffällig ist auch der leichte Anstieg der Werte der Fabaceen-Pollen *T. liblarensis/microhenrici*, die mit 9,9% ihren Maximalwert im gesamten Profil erreichen und mit durchschnittlich 3,3% zu den häufigen Elementen Pollenzone 2 gehören. Unverändert regelmäßig kommen zudem die Pollen von *Betula* (Birke), *Alnus* (Erle), und *Quercus* (Eiche) vor. Die Eichenpollen erreichen in 41,59 m Tiefe mit 14,6% sogar einen ungewöhnlich hohen Wert.

## Pollenzone 3

Sieben Proben zwischen 27,19 m und 12,95 m bilden die Pollenzone 3a, die in der Cluster-Analyse ebenfalls deutlich von den übrigen Proben aus der Tiefbohrung getrennt sind (Abb. 2). Ein sehr ähnliches Pollenspektrum zeigen dagegen die sieben Proben zwischen 8,95 m und 2,25 m, die aus der Testbohrung im Rohrloh-Maar untersucht wurden und die die Pollenzone 3b bilden.

Auch in Pollenzone 3 sind die Kiefernpollen (*Pinus*) wieder die dominierenden Elemente. In Zone 3a erreichen sie durchschnittlich 36,0%. In Zone 3b aus der Testbohrung sind sie mit durchschnittlich 25,2% etwas seltener. Sowohl in Zone 3a als auch in Zone 3b sind die Pollen der Fichte (*Picea*) dagegen deutlich weniger häufig als die Pollen der Kiefer. Während im überwiegenden Teil der Proben aus den



Zonen 1 und 2 die Pollen von Kiefer und Fichte mit ähnlichen Werten vertreten sind, kommen in Zone 3a Fichten-Pollen nur mit durchschnittlich 7,2% vor, in Zone 3b mit durchschnittlich 6,2%. Lediglich in der Probe aus 2,25 m Tiefe in der Testbohrung wird mit 24,2% ein hoher Wert für *Picea* erreicht und die Zahl der *Pinus*-Pollen sogar übertroffen.

Charakteristisch für die Pollenzone 3 ist aber insbesondere das häufige Auftreten von Pollen von *Engelhardia*, einer Gattung von laubwerfenden oder immergrünen Bäumen aus der Familie der Juglandaceae (Walnussgewächse, Abb. 5L-M), die heute vor allem in Südostasien vorkommen. Während in der Tiefbohrung in den unteren Proben von Zone 3a die Pollen noch selten sind, werden diese zum Top der Zone hin deutlich häufiger und erreichen in 17,39 m Tiefe mit 13,4% ihren Maximalwert. In der Testbohrung erlangen diese Pollen in der untersten Probe aus 8,95 m Tiefe sogar 26,8% und sind auch in den nachfolgenden Proben sehr häufig. Lediglich in den oberen beiden Proben von Zone 3b sind die Pollen von *Engelhardia* selten.

Stark verbreitet sind zudem die Pollen von *Castanea* (Kastanie) aus der Familie der Fagaceae (Buchengewächse, Abb. 6F-G, I-J). Kastanien sind heute vor allem in den gemäßigten Breiten der Nordhalbkugel verbreitet, hatten aber auch im Phanerozoikum während der Warmphasen des Eozän und Miozän eine starke Verbreitung gehabt (Taylor et al. 2009). In der Tiefbohrung erreichen sie in Zone 3a durchschnittlich 4,1% bei einem Maximalwert von 13,2%. In Zone 3b in der Testbohrung sind *Castanea*-Pollen mit durchschnittlich 12,1% sogar noch häufiger als in Zone 3a. Damit sind sie auch deutlich häufiger als in den Zonen 1 und 2, wo sie oftmals nur mit Einzelexemplaren in den Proben gefunden werden konnten.

In der Tiefbohrung fällt zudem das starke Auftreten von *Fagus*-Pollen mit durchschnittlich 12,6% auf. Auch wenn diese Pollen schon in Zone 2 häufiger vorkommen, liegt der Verbreitungsschwerpunkt in Zone 3a. In der Testbohrung ist der *Fagus*-Pollen in einigen Proben ebenfalls häufig, auch wenn durchschnittlich nur 2,4% erreicht werden.

Auffällig in Zone 3b sind in den drei Proben zwischen 6,90 m und 5,00 m zudem die hohen Werte für *Platanus*-Pollen (Platane, Abb. 6H). Diese kommen in Zone 3a dagegen nur in einer Probe vor. Zu den weiteren Pollen, die in Zone 3b relativ häufig vorkommen, zählen auch andere Fagaceen-Pollen, wie *Tricolporopollenites pseudocingulum* (Abb. 6O) und *T. villensis*, zu denen keine heute verbreitete Gattung oder gar Art der Fagaceen genauer zugeordnet werden können. Auch Pollen von *Betula* und der Cupressaceae s.l. sind häufig im Pollenspektrum vertreten. In Zone 3a sind die Pollen der Zypressengewächse ebenfalls sehr häufig. Auch der Pollen von *Betula* kommt regelmäßig vor, wobei höhere Werte wie in den Zonen 1 und 2 allerdings nicht erreicht werden. Die anderen Fagaceen-Pollen sind im Gegensatz zur Zone 3b in Zone 3a nicht häufig, sondern nur in einigen Proben mit Einzelexemplaren vertreten.



Die oberste Probe aus der Testbohrung aus 0,85 m Tiefe zeigt eine völlig andere Zusammensetzung des Palynomorphenspektrums. Hier sind Pollen der Sauergrasgewächse (Cyperaceae) und Birkenpollen (*Betula*) die dominierenden Elemente und zeigen einen typischen heutigen Bewuchs in einem Feuchtgebiet rund um einen Teich/Tümpel an. Es handelt sich hier um eine Probe aus dem Quartär, vermutlich dem Holozän, so dass diese Probe im Rahmen dieser Untersuchung hier nicht weiter berücksichtigt wird.

## Diskussion

### Stratigraphie

Die Pollendiagramme und die quantitativen Verteilungen der Palynomorphen in den beiden Bohrungen aus Rohrloh lassen eine stratigraphische Einstufung der lakustrinen Abfolgen zu. Hierfür können insbesondere die pollenstratigraphischen Gliederungen des Miozäns und Pliozäns von von der Brellie (1967) und von der Brellie et al. (1988) für Mitteleuropa, von Piwocki & Ziemińska-Tworzydło (1997) für Polen sowie die stratigraphischen Untersuchungen für das Oligozän und Untermiozän in Süddeutschland und Oberösterreich von Hochuli (1978) genutzt werden. Hochuli (1978) nutzte dabei auch die palynostratigraphischen Tabellen von Krutzsch (1966), in denen die stratigraphische Reichweite einer großen Anzahl von morphologisch exakt definierten Formen dargestellt ist. Für das Paläogen wurden 20 SPP-Zonen (Krutzsch et al. 1992) und für das Neogen 16 SPN-Zonen (Krutzsch 2000) unterschieden. In der detaillierten stratigraphischen Arbeit von Piwocki & Ziemińska-Tworzydło (1997) wird das Neogen in 14 Pollenzonen unterteilt, die jeweils durch charakteristische Palynomorphen gekennzeichnet sind, wobei vor allem Häufigkeitsänderungen bestimmter Pollentaxa eine Rolle spielen. Die Zonen I bis V umfassen das untere Miozän, die Zonen VI bis Teile von X das mittlere Miozän, die Zonen X bis XII das obere Miozän und schließlich die Zonen XIII bis XIV das Pliozän.

In den lakustrinen Sedimenten aus dem Rohrloh-Maar ist in Pollenzone 1 das markanteste Merkmal das hohe Vorkommen von *Carya*-Pollen. Diese Pollen treten in Mittel- und Süddeutschland zwar schon im Alttertiär auf, verschwinden dann aber im Obereozän und treten wieder im untersten Unteroligozän in der SPP-Zone 19 regelmäßig auf (Krutzsch 1966, Hochuli 1978). In den Floren der nachfolgenden SPP-Zone 20a (oberstes Unter-Oligozän – unteres Mitteloligozän, Hochuli 1978) erreichen *Carya*-Pollen schon Anteile von über 10%. Während des Mittel- und Oberoligozän (SPP-Zone 20b, Neogen-Zone I, Krutzsch 1966, Hochuli 1978) bleibt *Carya* häufig. Im unteren Burdigalium wird *Carya* im Vorkommen aus Oberösterreich und Süddeutschland dann sogar sehr häufig (Hochuli 1978). Nach von der Brellie (1967) ist *Carya* im Neogen Mitteleuropas durchgehend vorhanden, erreicht in den Pollenspektren neogener Floren aber kaum 10%. Der Verbreitungsschwerpunkt liegt nach von der Brellie (1967) ebenfalls im unteren Miozän (Aquitanium – Burdigalium).



Im polnischen Neogen kommen *Carya*-Pollen ebenfalls im gesamten Neogen vor, aber insbesondere in den Pollen I bis VII (Unter- bis unteres Mittelmiozän) sind die Formen häufiger (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997). Das hohe Vorkommen von *Carya*-Pollen mit bis 25,9% in Pollenzone 1 zeigt somit deutlich eine Ablagerung der lakustrinen Sedimente während des unteren Miozäns an.

Während Pollenzone 1 durch das Auftreten von *Carya*-Pollen gekennzeichnet ist, beginnt in Pollenzone 2 die starke Verbreitung von *Fagus*-Pollen (*Tricolporopollenites pseudocruciatus*). Während Hochuli (1978) diese Pollen als identisch zu modernen Pollen von *Fagus sylvatica* beschreibt, wird diese Pollenart für das polnische Neogen als *Nyssa*-Pollen beschrieben (*Nyssapollenites pseudocruciatus*), wobei auch eine Zuordnung zu *Fagus* nicht ausgeschlossen wird (Ziemińska-Tworzydło 1974). In den Proben aus dem Rohrloh-Maar zeigen diese Pollen große Ähnlichkeiten zu modernen *Fagus*-Pollen und unterscheiden sich deutlich von typischen *Nyssa*-Pollen, die ebenfalls regelmäßig in den Rohrloh-Proben vorkommen (Abb. 6N). *Fagus*-Pollen treten in der Lausitz von SPP 18 (oberes Eozän) an regelmäßig auf, sind dort im Oligozän durchgehend und im Oberoligozän (Neogen-Zone I) sogar sehr häufig vorhanden (Hochuli 1978). Im nordalpinen Raum ist ihr Vorkommen dagegen erst vom Mitteloligozän an zu belegen und *Fagus*-Pollen erscheinen auch bis ins Burdigalium nur selten (Hochuli 1978). Auch im polnischen Neogen kommen *Fagus*-Pollen erst ab dem mittleren Oligozän vor, wobei dort *Fagus*-Pollen, wie oben beschrieben, möglicherweise auch als *Nyssapollenites* bezeichnet werden, die bereits ab dem untersten Miozän häufig vorkommen (Ziemińska-Tworzydło 1974, Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997).

Stratigraphisch relevant und charakteristisch für Pollenzone 3 sind die hohen Werte für die *Engelhardia*-Pollen (*Momipites punctatus*), die sowohl in der Forschungs- als auch der Testbohrung (Zonen 3a, 3b) sehr häufig vorkommen. *Momipites* ist in Süddeutschland bereits ab der SPN-Zone I häufig, insbesondere aber in der SPN-Zone II sowie im Ottnangium (Aquitanium – Burdigalium) und wird dort zu einem der häufigsten thermophilen Elemente (Hochuli 1978). Die etwas kleinere Pollenart *Momipites quietus*, die vor allem im Eozän auftritt (Hochuli 1978), ist in den Proben aus Rohrloh nicht vorhanden. Nach von der Brelie (1967) sind Floren in Mitteleuropa im obersten Oligozän während des Chattiums durch regelmäßige Vorkommen von *Engelhardia*-Pollen gekennzeichnet, wobei der durchschnittliche prozentuale Anteil noch bei unter 10% liegt. Im untersten Miozän (Aquitanium) nehmen die Werte dann deutlich zu und Anteile von weit über 20% innerhalb von Pollenspektren sind typisch. Im Burdigalium sinken die Werte dagegen wieder deutlich. Mit rund 10% Anteil innerhalb der Pollenspektren sind die Werte aber höher als im obersten Oligozän. Werte bis 13,4% in der Forschungsbohrung und sogar bis 26,8% in der Testbohrung zeigen somit eindeutig an, dass es sich bei den Ablagerungen aus dem Rohrloh-Maar um untermiozäne Sedimente handeln muss. Ein häufiges Vorkommen von *Engelhardia*-Pollen vor allem in den untermiozänen Pollenzonen I bis VI wird auch für



das Vorkommen im polnischen Neogen beschrieben, wobei die Pollen insbesondere in den Zonen I und III häufig sind, was ebenfalls auf ein untermiozänes Alter hindeutet (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997).

Auch die *Castanea*-Pollen (*Tricolporopollenites cingulum fusus*, *T. cingulum pusillus*), die in Rohrloh zusammen mit *Engelhardia*-Pollen vor allem in Pollenzone 3 vorkommen, sind im polnischen Neogen mit hohen Werten vor allem auf die Zonen I bis VI beschränkt, *T. cingulum fusus* als „altes“ paläogenes Element sogar nur auf das Aquitanium (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997). Das Gleiche gilt auch für die Fabaceen-Pollen *Tricolpopollenites liblarensis*, die in der Forschungsbohrung in nahezu allen Proben regelmäßig bis häufig vorkommen. Im polnischen Neogen verschwinden diese Pollen ab dem mittleren Miozän völlig (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997), so dass auch diese Formen ein untermiozänes Alter des Rohrloh-Maars anzeigen.

Von der Brelie (1967) beschreibt mit *Quercoidites microhenrici* und *Quercoidites henrici* zwei tricolpate Formen in ihrer Häufigkeitsverteilung, die vermutlich mit *Tricolpopollenites liblarensis* sowie *Tricolpopollenites asper* (*Quercus*) in den Proben aus Rohrloh übereinstimmen. *Quercoidites microhenrici* bzw. *Tricolporopollenites microhenrici* (in Hochuli 1978) sind von *T. liblarensis* morphologisch kaum zu unterscheiden, da lediglich die Skulptur der Außenwand leicht unterschiedlich ist. *T. microhenrici* fehlt nach von der Brelie (1967) nahezu im Aquitanium, ist mit bis zu 10% Anteil häufig in Pollenspektren von Floren aus dem Burdigalium aber massenhaft mit Anteilen bis zu 40% im mittleren Miozän. Das hohe, aber nicht massenhafte Auftreten von *T. liblarensis* im Rohrloh-Maar deutet somit auf ein untermiozänes Alter (Burdigalium) hin. Ähnlich sieht es beim *Quercus*-Pollen aus. Bis zu 20% nehmen *Q. henrici* im Spektrum von Floren aus dem Burdigalium ein (von der Brelie 1967). Vorher sind sie im Aquitanium regelmäßig, aber deutlich seltener vorhanden. In der Forschungsbohrung aus dem Rohrloh-Maar sind Pollen vom *Quercus*-Typ ebenfalls regelmäßig vorhanden, allerdings in nur einer Probe aus Pollenzone 2 stark vertreten. Auch dieses Auftreten spricht somit für ein untermiozänes Alter der lakustrinen Sedimente.

Der *Castanea*-Pollen *T. cingulum fusus* kommt nach von der Brelie (1967) regelmäßig in den Floren aus dem Burdigalium vor, ist dort aber nicht häufig. Von der Brelie (1967) beschreibt jedoch mit der Häufigkeit von *Tricolporopollenites villensis* und *T. pseudocingulum* weitere Pollen-Arten, die zwar nicht zu *Castanea* gestellt werden, aber zur gleichen Familie der Fagaceae. Beide Pollentaxa sind in den Proben aus dem Rohrloh-Maar als „sonstige Fagaceae“ ausgezählt worden und insbesondere in Pollenzone 3b häufiger. Nach von der Brelie (1967) ist das ebenfalls typisch für das Burdigalium, während im älteren Aquitanium *T. pseudocingulum* zwar gelegentlich häufig ist, *T. villensis* aber fehlt.

Interessant in der Abfolge von Rohrloh ist in der Testbohrung das häufige Auftreten von *Platanus*-Pollen (*Platanipollis ipelensis*) in einigen Proben. In der



stratigraphischen Tabelle des polnischen Neogens von Piwocki & Ziemińska-Tworzydło (1997) wird die Form überhaupt nicht aufgeführt, da es sich vor allem um eine oligozäne Form handelt, die im polnischen Neogen lediglich bis ins Aquitanium erscheint. Słodkowska (2009) berichtet von einer Pollenvergesellschaftung von *Pinus*, den Cupressaceen, *Sciadopitys*, *Castanea* (*T. cingulum pusillus/fusus*) sowie *Platanipollis ipelensis* in einer Lokalität im Nordosten Polens. Aufgrund von marinen Dinoflagellaten konnte das Alter der Sedimente, die diese Palynomorphen-Assoziation enthalten, auf das oberste Eozän bis unterstes Oligozän eingengt werden. Die *Platanus*-Pollen sind somit typische paläogene Reliktelemente, die nach von der Brellie (1967) noch regelmäßig im Aquitanium auftreten, im Burdigalium allerdings schon verschwunden sind.

Die stratigraphische Tabelle aus Larsson et al. (2006) führt zusätzlich noch die Pollen von *Platycarya* als stratigraphisch relevant auf, da diese nur bis zum Ende des Burdigaliums vorkommen. *Platycarya*-Pollen sind in Rohrloh nicht häufig, treten aber regelmäßig in Einzelexemplaren auf und sind somit ein weiterer Marker für ein untermiozänes Alter der Ablagerungen im Maar.

Andere in den Rohrloh-Proben häufig vorkommende Formen wie insbesondere die Pollen der Koniferen (Cupressaceae s.l., *Picea*, *Pinus*), die das Pollenspektrum dominieren, sind von geringerer stratigraphischer Bedeutung, da sie als Durchläufer bezeichnet werden können, die nahezu im gesamten Neogen vorkommen.

Zusammenfassend lässt das Pollenspektrum, dass in den beiden Bohrungen aus dem Rohrloh-Maar erfasst werden konnte, eindeutig ein untermiozänes Alter erkennen. In einem früheren Gutachten über die Bohrung im Maarsee von Bärnau, bei dem auch die Proben aus der Testbohrung von Rohrloh berücksichtigt wurden, sind die Sedimente aus Rohrloh bereits auf das Aquitanium bis untere Burdigalium datiert worden (Lenz 2021).

Hochuli (1978) sowie Piwocki & Ziemińska-Tworzydło (1997) beschreiben typische Floren aus dem Untermiozän aus dem Paratethys-Gebiet und dem polnischen Neogen. Im polnischen Neogen wird die Zone I (Aquitanium) vor allem durch zwei stratigraphisch relevante Formen geprägt, die in den Proben aus dem Rohrloh-Maar fehlen. Weder Pollen der Olacaceae (*Olaxipollis matthesii*) noch von *Alangium* (*Alangiopollis barghoornianum*) sind zu finden, die in Zone I häufig sein müssten. Auch Palmenpollen und tropische Farne der Schizaeaceae (Abb. 5A) sind nur selten vorhanden. Dass eine Zuordnung zur Zone I jedoch nicht völlig ausgeschlossen werden kann, liegt daran, dass im Aquitanium Sumpfwälder aus *Taxodium*, *Alnus*, *Nyssa* und Farnen aus der Gruppe der Polypodiaceae in polnischen Sedimentbecken verbreitet waren (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997). Entsprechende Pollen sind auch im Rohrloh-Maar häufig vertreten. Charakteristisches Merkmal von Zone II (oberes Aquitanium) ist im polnischen Neogen das häufige Auftreten von Pollen von *Alnus* und Koniferen, die auch im Rohrloh-Maar regelmäßig vorkommen bzw. dominierende Elemente sind. In Zone III sind Palmenpollen (Arecaceae, *Arecipites*)



charakteristisch, die vereinzelt in den Rohrloh-Proben auftreten. Auch in dieser Zone sind *Nyssa-Taxodium*-Sumpfwälder stark verbreitet. Nach Piwocki & Ziemińska-Tworzydło (1997) spiegelt diese Zone das wärmste Klima während des gesamten Miozäns wider. In Zone IV kommt es zu Massenvorkommen von Pollen der Ulmaceae (*Polyporopollenites undulosus*), die auch in den Rohrloh-Proben häufige Elemente sind. Auch die Dominanz von Koniferen-Wäldern mit *Pinus*, *Sciadopitys* und *Tsuga* ist charakteristisch für Zone IV. Alle drei Koniferen-Arten kommen regelmäßig (*Sciadopitys*, *Tsuga*) oder dominierend (*Pinus*) im Rohrloh-Maar vor. Diese Zone des polnischen Neogens entspricht dem Ottnangium aus dem Paratethys-Bereich. Hochuli (1978) beschreibt für diesen Abschnitt eine typische Pollenassoziation: Den Hauptteil stellen intermediäre Elemente, die im Pollendiagramm als „cool temperate forests elements“ bezeichnet werden. Insbesondere *Carya* (*Caryapollenites simplex*) ist häufig im Paratethys-Bereich, aber auch *Abies* ist mit rund 10% Anteil am Pollenspektrum recht häufig. Der Ulmaceen-Pollen (*Polyporopollenites undulosus*) ist ähnlich wie im gleichalten polnischen Neogen mit ähnlich hohen Anteilen wie *Abies* eine weitere häufige Form. Formen, die mit rezenten *Quercus*-Pollen zu vergleichen sind (*Tricolpopollenites microhenrici*) erscheinen im Ottnangium erstmal häufiger im Pollenbild. Der *Corylus*-Pollen (*Triporopollenites corylus*) kommt erstmals in den Pollenspektren des Neogens im Paratethys-Gebiet vor. Sowohl in der untermiozänen Neogen-Zone II als auch im Ottnangium sind *Engelhardia*-Pollen dominierende Elemente (Hochuli 1978).

In Zone V (oberstes Untermiozän) des polnischen Neogens kommen mit den Pollen von *Quercus* (*Quercoidites henrici*/*Tricolpopollenites asper*) sowie *Tricolporopollenites pseudocingulum* weitere Elemente hinzu (Piwocki & Ziemińska-Tworzydło 1997), die auch im Rohrloh-Maar zumindest teilweise häufig auftreten. Auch in dieser Zone sind *Nyssa-Taxodium*-Sumpfwälder charakteristisch.

Auch wenn es leichte Unterschiede in der prozentualen Häufigkeit dieser Taxa im Vergleich zwischen den von Hochuli (1978) und Piwocki & Ziemińska-Tworzydło (1997) beschriebenen Abfolgen und den hier vorgestellten Untersuchungen aus Rohrloh gibt, ist die Übereinstimmung der untermiozänen Pollenspektren sehr hoch. Es muss außerdem beachtet werden, dass zum Beispiel die Pollenspektren aus dem polnischen Neogen zumeist aus Kohlen bzw. einer torfbildenden Sumpfgesellschaft stammen, während in Rohrloh hauptsächlich die Vegetation auf den Hängen eines Maar-Kraters und seiner näheren Umgebung zum Pollenniederschlag beiträgt. Somit haben die paläoökologischen Bedingungen deutlichen Einfluss auf die Zusammensetzung der Pollenvergesellschaftung. Dementsprechend gibt es sicherlich Unterschiede und die Pollenspektren müssen sich nicht 1:1 im Vergleich zur torfbildenden Sumpfgesellschaft entsprechen. Letztendlich gibt es deutliche Ähnlichkeiten zu Spektren aus den Aquitanium sowie Burdigalium, so dass ein untermiozänes Alter der Abfolge belegt werden kann.



## Paläoökologie

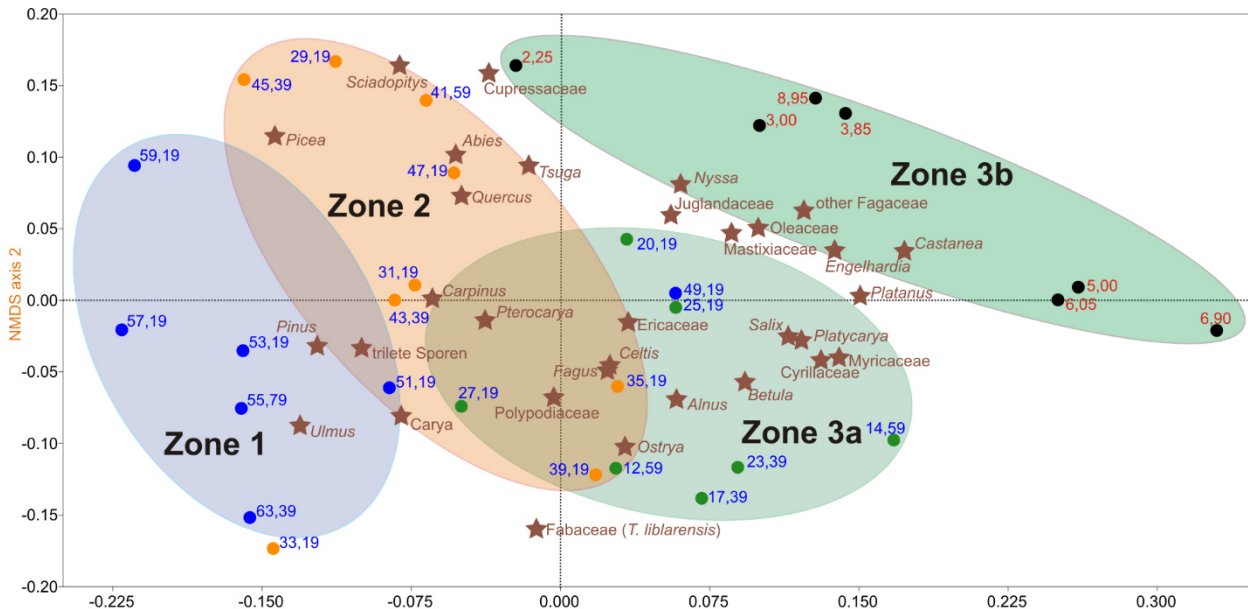


Abb. 3: NMDS (Nicht-metrische Multidimensionale Skalierung) von 30 Proben und 32 Pflanzenfamilien/-gattungen aus den beiden Bohrungen im Maarsee von Rohrloh (Testbohrung: 7 Proben, Forschungsbohrung: 23 Proben). Für die Analyse wurden die Rohdaten standardisiert (*Wisconsin double standardization*) und die NMDS mit dem Bray Curtis Unähnlichkeitsmaß durchgeführt.

Bei der stratigraphischen Ansprache der lakustrinen Sedimente muss auch die paläoökologische Entwicklung berücksichtigt werden, denn die Vegetationsentwicklung hängt vor allem auch mit der Wiederbesiedlung der Hänge des Maar-Kraters zusammen. Es ist davon auszugehen, dass bei dem Ausbruch, der zur Kraterbildung geführt hat, zunächst einmal die nähere Umgebung des Maars verwüstet wurde und diese dementsprechend vegetationsfrei war. Die Wiederbesiedlung des Gebietes lief dann über verschiedene Phasen ab, die jeweils durch eine charakteristische Vegetation gekennzeichnet war. Die NMDS der 23 untersuchten Proben aus der Tiefbohrung zeigt dementsprechend auch eine deutliche Entwicklung in der Vegetation an (Abb. 3). Die Proben aus den Pollenzonen 1, 2 3a und 3b sind in der NMDS von links nach rechts angeordnet. Dabei überlappen sich die Zonen 1, 2, und 3a und zeigen einen allmählichen Übergang in der Vegetationszusammensetzung an. Lediglich die beiden Subzonen 3a und 3b sind deutlich voneinander getrennt. Das könnte darauf hindeuten, dass die Sedimente aus Zone 3b etwas jünger sind als die Sedimente aus Zone 3a.

Nach Lenz et al. (2023) lassen sich bei der schrittweisen Wiederbesiedlung von Maar-Seen durch die Vegetation vier verschiedene Phasen unterscheiden: (1) eine Initialphase (*initial phase*), (2) eine Wiederbesiedlungsphase (*recolonisation phase*), (3) eine Erholungsphase (*recovery phase*), (4) eine Klimaxphase (*climax phase*). Die Initialphase stellt die Phase unmittelbar nach dem Ausbruch, der zur Kraterbildung



geführt hat, dar, als die Vegetation in der näheren Umgebung wahrscheinlich vollständig zerstört war. Proben aus dieser Phase sind in der Regel noch nahezu frei von Palynomorphen, da noch keine Vegetation vorhanden war. Nur wenige Pollen der zonalen Vegetation können aus der Ferne in das Kratergebiet transportiert werden und lassen sich möglicherweise in den lakustrinen Sedimenten nachweisen. Es sind die ältesten Sedimente innerhalb der lakustrinen Abfolge, die noch während der holomiktischen Seephase abgelagert wurden. Die Kraterhänge waren noch instabil, was dazu führte, dass es zu einem hohen Sedimenteintrag in Form von Schuttströmen in das Kraterbecken kam. Im Rohrloh-Maar sind die ältesten lakustrinen Sedimente vermutlich nicht erbohrt worden, da nur wenige Meter Sediment aus der holomiktischen Seephase in der Bohrung erfasst wurden. Die beiden Proben aus dieser Phase sind zwar frei von Palynomorphen. Das ist aber vermutlich erhaltungsbedingt, da die rötliche Farbe der Sedimente ein oxidierendes Milieu anzeigt. Demzufolge ist das Fehlen von Palynomorphen eher auf Oxidation zurückzuführen und weniger auf ein Nichtvorhandensein einer Vegetation.

Ebenfalls noch in der holomiktischen Seephase beginnt die Wiederbesiedlung (*recolonisation phase*). Diese Phase ist durch die Ausbreitung einer Pioniervegetation gekennzeichnet. Insbesondere Farne sind wichtige Elemente dieser Vegetation. Im Rohrloh-Maar kommen Farnsporen in der Tat am häufigsten in den unteren Proben vor, allerdings ist ihre Gesamtzahl nicht hoch, so dass der Höhepunkt der Ausbreitung einer Pioniervegetation wohl ebenfalls nicht mehr erbohrt wurde. Charakteristisch für Pollenzone 1 ist neben dem hohen Auftreten von *Carya* vor allem die Maximalausbreitung von Pollen der Ulmaceen.

Ulmaceen, insbesondere die Gattung *Cedrelospermum* gilt als schnell wachsende Pionierpflanze, die vulkanische Substrate unter verschiedenen klimatischen Bedingungen besiedelt (Manchester 1989). Auch wenn die im Rohrloh-Maar nachgewiesene *Polyporopollenites undulosus* nicht eindeutig *Cedrelospermum* zugewiesen werden kann, weil auch die Gattungen *Ulmus* und *Zelkova* nahezu identisch aussehende Pollen produzieren, deutet das verstärkte Auftreten dieser Pollen in Pollenzone 1 daraufhin, dass es sich bei den Pflanzen noch um Elemente einer Pioniergesellschaft gehandelt hat, zumal die Pollen in den folgenden Pollenzonen dann verschwinden.

Auch *Carya* gehört zu den wichtigen Elementen in den frühen Wäldern, die nach der Pioniervegetation in der Erholungsphase (*recovery phase*) den Kraterbereich besiedelten. Das bedeutet, dass in dieser Phase die Waldvegetation aus der Umgebung des Kraters in den Kraterbereich einzuwandern begann und dort die Pioniervegetation ersetzte. Die Kraterhänge wurden dann durch tief wurzelnde Bäume eines Waldes stabilisiert, was schließlich zum Wechsel von holomiktischen zu meromiktischen Bedingungen im See führte.

Im Rohrloh-Maar können die Sedimente aus Pollenzone 1 somit der *recovery phase* zugeordnet werden, in dem noch letzte Pionierelemente vorhanden waren, die dann



durch eine erste Waldvegetation ersetzt wurden. Dieser Wald hatte aber noch nicht die Zusammensetzung der robusten Klimaxvegetation der nachfolgenden *climax phase*, in der die ursprüngliche Waldvegetation, wie sie vor dem Ausbruch und der Maarbildung verbreitet war, die Kraterhänge wieder vollständig überwachsen hatte. Dieser Übergang zur Klimaxvegetation ist im Rohrloh-Maar in Pollenzone 2 zu erkennen, während die Zone 3 mit den Subzonen 3a und 3b dann die Klimaxvegetation widerspiegelt, in der dann Juglandaceen wie *Engelhardia* oder Fagaceen wie *Castanea* und *Fagus* dominierende Elemente waren.

Somit ist die Häufigkeit einzelner palynologischer Taxa in der Abfolge nicht eindeutig ein stratigraphisches Element, sondern vor allem ein Spiegel der Wiederbesiedlungsgeschichte. Stratigraphisch bedeutende Elemente wie der *Castanea*-Pollen kommen somit erst im Pollenniederschlag der Klimaxvegetation stärker zur Geltung. Ihr Fehlen im unteren Bereich der lakustrinen Abfolge ist darin begründet, dass sie keine Elemente der Pioniervegetation waren. Die Waldvegetation mit *Castanea* wurde durch den Ausbruch, der zur Maarbildung führte, zurückgedrängt, sodass der Pollen in den älteren Seesedimenten in Rohrloh noch keine Rolle spielt. Das Fehlen dieser Pollen ist also nicht stratigraphisch zu begründen, sondern durch die Umweltverhältnisse. Ähnliches gilt auch für die anderen Elemente im Pollenniederschlag, deren Häufigkeitsänderungen zur Gliederung in verschiedene Pollenzone führt. Stratigraphisch ist das Pollenspektrum somit vor allem in der Gesamtheit zu betrachten.

Auch bei paläoklimatischen Aussagen muss die Wiederbesiedlung des Maars berücksichtigt werden. In der Klimaxvegetation der Zonen 3a und 3b sind die wärmeliebenden Taxa deutlich häufiger als in den Pollenzonen 1 und 2. Dort sind kühl-gemäßigte Elemente wie *Picea* deutlich stärker verbreitet. Dies kann aber auch daran liegen, dass eine dichte Waldvegetation mit entsprechendem Pollenniederschlag sich erst in der Klimaxphase der Zone 3 im Kratergebiet ausgebreitet hat. Vorher war die Vegetation während der Wiederbesiedlungs- und Erholungsphasen noch nicht so dicht, so dass luftsacktragende Pollen wie der von *Picea*, die über weite Strecken in den Kraterbereich transportiert wurden, sich dort anreicherten. Erst als die Waldvegetation im Kraterbereich verbreitet war, wurde der Anteil an *Picea* im Pollenspektrum dann zurückgedrängt. Somit ist der Wechsel von einer kühl-gemäßigten Vegetation zu einer wärmeliebenden Vegetation in Zone 3 nicht rein klimatisch zu begründen, sondern vermutlich ebenfalls mit der paläoökologischen Entwicklung.

Allerdings zeigt *Picea* starke Häufigkeitsschwankungen, die zyklische Wechsel in der Häufigkeit von Fichten in der weiteren Umgebung andeuten. Dies könnte in der Tat ein paläoklimatischer Befund sein, der auf zyklische Klimaschwankungen hindeutet, die möglicherweise auf den Einfluss von orbitalen Änderungen im Milankovitch-Bereich hindeuten. Auch bei anderen Pollen wie Pinus sind zyklische Änderungen zumindest angedeutet. Für genauere Aussagen zur klimatischen Entwicklung und



dem Einfluss von Milankovitch-Zyklen müsste jedoch die Probendichte in einer weitergehenden Untersuchung deutlich erhöht werden.

## Zusammenfassung

Die palynologische Analysen von 23 Proben aus der Forschungsbohrung im Rohrloch-Maar bestätigen die schon vorhandene stratigraphische Einstufung der Sedimente aus der Testbohrung. In nahezu allen untersuchten Proben konnten sehr gut erhaltene Pollen, Sporen und Algen in hoher Zahl nachgewiesen werden. Die Pollenspektren zeigen typische Assoziationen untermiozäner Pollengesellschaften Mittel- und Nordwesteuropas. Dadurch können die Sedimente aus dem Maar von Rohrloch auf das unterste Miozän (oberes Aquitanium/unteres Burdigalium) datiert werden. Dies liegt insbesondere an stratigraphisch relevanten Elementen wie den *Carya*- und *Engelhardia*-Pollen sowie dem häufigen Vorkommen von „alten“ paläogenen Taxa wie den *Platanus*- oder *Castanea*-Pollen.

Der Pollenniederschlag im Maar ist durch hohe Werte von Pollen der Cupressaceae s.l. geprägt, was darauf hindeutet, dass im Uferbereich des Maarsees Sumpfwälder verbreitet waren. Neben den Zypressen enthielt der Sumpfwald auch Angiospermen-Taxa wie Myricaceae, *Nyssa*, *Betula* oder *Alnus*. Zahlreiche Pollentaxa zeigen das Vorhandensein von mesophytischen Wäldern in der Umgebung des Maarsees an. Dies betrifft zum Beispiel die Pollen von immergrünen Nadelbäumen wie *Pinus*, *Sequoia* und *Sciadopitys* oder von laubabwerfenden Angiospermen wie *Fagus* oder *Quercus*.

Die konstante Veränderung in der Vegetation ist auf die Wiederbesiedlung der Kraterhänge und der näheren Maar-Umgebung zurückzuführen. Sind im unteren Bereich der lakustrinen Abfolge noch Reste einer Pioniervegetation vorhanden (Pollenzone 1), erreicht danach die Waldvegetation den Krater. Zuerst verbreiten sich schnellwachsende Bäume wie *Carya* und die Ulmaceen (Pollenzone 2), bevor die Klimaxvegetation mit Juglandaceen und Fagaceen zum Ende der Maarentwicklung (Pollenzone 3) das Gebiet zurückerobert.

## Literatur

Brelie, von der, G. (1967). Quantitative Sporenuntersuchungen zur stratigraphischen Gliederung des neogens in Mittel-Europa. - Review of Palaeobotany and Palynology 2:147-162.

Brelie, von der, G., Meyer, K.J., Shuler, M. & Zagwijn, W.H. (1988). Interregional range chart of the pollen of the Neogene of the NW European Tertiary Basin (Fig



160). In R. Vinken (ed.): The Northwest European Tertiary basin. Geologisches Jahrbuch A 100, 1–508.

Hochuli, P.A. (1978): Palynologische Untersuchungen im Oligozän und Untermiozän der zentralen und westlichen Paratethys- Beiträge Paläontol. Österreich 4: 1- 132.

Krutzsch, W. (1966): Die sporenstratigraphische Gliederung des älteren Tertiärs im nördlichen Mitteleuropa (Paleozän-Mitteloligozän). — Methodische Grundlagen und gegenwärtiger Stand der Untersuchungen. — Abh. zentr. geol. Inst. 8:112—149.

Krutzsch, W. (2000): Stratigraphische Tabelle Oberoligozän und Neogen (marin-kontinental). – Berliner geowiss. Abh., E34: 153–165.

Krutzsch, W., Blumenstengel, H., Kiesel, Y. & Rüffle, L. (1992): Paläobotanische Gliederung des Alttertiärs (Mittelleozän bis Oberoligozän. N. Jb. Geol. Paläont., Abh. 186: 137-253, Stuttgart.

Larsson, L.M., Vajda, V. & Rasmussen, E.S. (2006). Early Miocene pollen and spores from western Jylland, Denmark – environmental and climatic implications. GFF, 128: 261–272.

Lenz, O. (2021): Bericht zu den biostratigraphischen Untersuchungen von Proben aus der Forschungsbohrung Bärnau (Landkreis Tischenreuth) unter Berücksichtigung von Proben aus Bohrungen bei Rohrloh und dem tschechischen Zary-Maar. Gutachten für das Bayerische Landesamt für Umwelt. 23 S.

Lenz, O., Wilde, V., Moshayedi, M., Mutzl, J. & Hinderer, M. (2023): High-resolution regional vegetation analyses for Eocene records on the Sprendlinger Horst in Southwest Germany. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 174: 613-632.

Manchester, S.R. (1989): Attached reproductive and vegetative remains of the extinct American–European genus *Cedrelospermum* (Ulmaceae) from the early Tertiary of Utah and Colorado. American Journal of Botany 76: 256–276.

Piwocki, M. & Ziemińska-Tworzydło, M. (1997). Neogene of the Polish Lowlands – lithostratigraphy and pollen-spore zones. - Geol. Quart., 41 (1): 21–40.

Słodkowska, B. (2009). Palynology of the Palaeogene and Neogene from the Warmia and Mazury areas (NE Poland). - Geologos, 15 (3–4): 219–234.

Stuchlik, L., Ziemińska-Tworzydło, M., Kohlman-Adamska, A., Grabowska, I., Ważyńska, H., Słodkowska, B. & Sadowska, A. (2001): Atlas of Pollen and Spores



of the Polish Neogene. Volume 1 – Spores. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Krakow.

Stuchlik, L., Ziemińska-Tworzydło, M., Kohlman-Adamska, A., Grabowska, I., Ważyńska, H. & Sadowska, A. (2002): Atlas of Pollen and Spores of the Polish Neogene. Volume 2 – Gymnosperms. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Krakow.

Stuchlik, L., Ziemińska-Tworzydło, M., Kohlman-Adamska, A., Grabowska, I., Słodkowska, B., Ważyńska, H. & Sadowska, A. (2009): Atlas of Pollen and Spores of the Polish Neogene. Volume 3 – Angiosperms (1). W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Krakow.

Stuchlik, L., Ziemińska-Tworzydło, M., Kohlman-Adamska, A., Grabowska, I., Słodkowska, B., Worobiec, E. & Durska, E. (2014): Atlas of Pollen and Spores of the Polish Neogene. Volume 4 – Angiosperms (2). W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Krakow.

Taylor, T.N., Taylor, E.L. & Krings, M. (2009). Palaeobotany, the biology and evolution of fossil plants, ed. 2. Academic Press, Elsevier, Burlington, MA.

Thiele-Pfeiffer, H. (1980): Die miozäne Mikroflora aus dem Braunkohlentagebau Oder bei Wackersdorf/Oberpfalz. – Palaeontographica B, 174: 95–224.

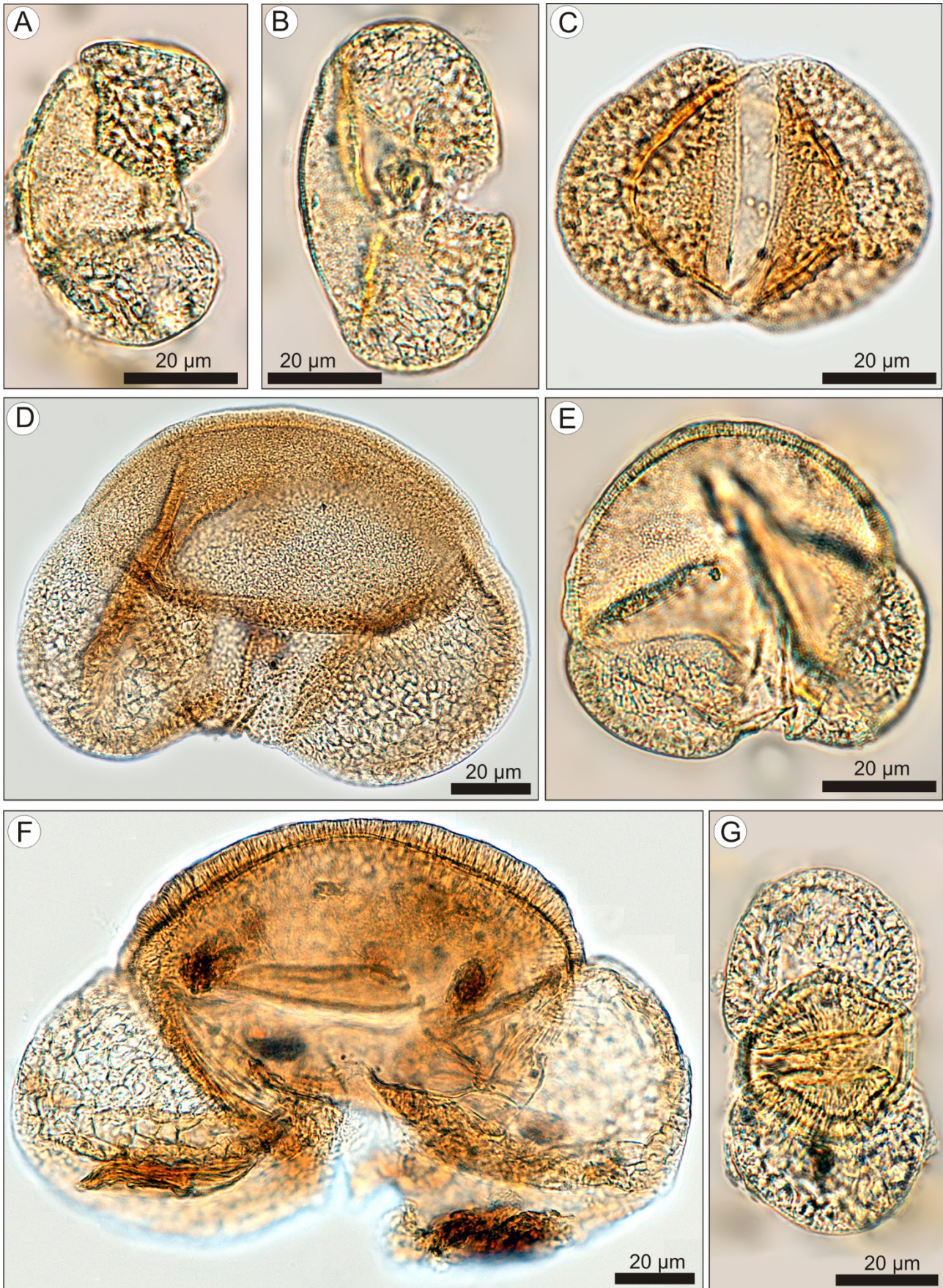
Ziemińska-Tworzydło, M. (1974). Palynological characteristics of the Neogene of Western Poland. - Acta Palaeont. Pol., 19: 309-432.

Darmstadt, 08.11.2023



*Abb. 4 (nächste Seite): Ausgewählte Pollen aus der Testbohrung (TB) sowie der Forschungsbohrung (FB) im Rohrloh-Maar*

- A, B, C: Pityosporites labdacus  
(Pinus, Kiefer, A: FB 20,19 m, B: FB 27,19 m, C: TB 2,25 m)*
- D, E: Piceapollis tobolicus  
(Picea, Fichte, D: TB 2,25 m, E: FB 20,19 m)*
- F: Abiespollenites lattisaccus  
(Abies, Tanne, TB 2,25 m)*
- G: Podocarpidites libellus  
(Podocarpus, Steineibe, FB 17,39 m)*

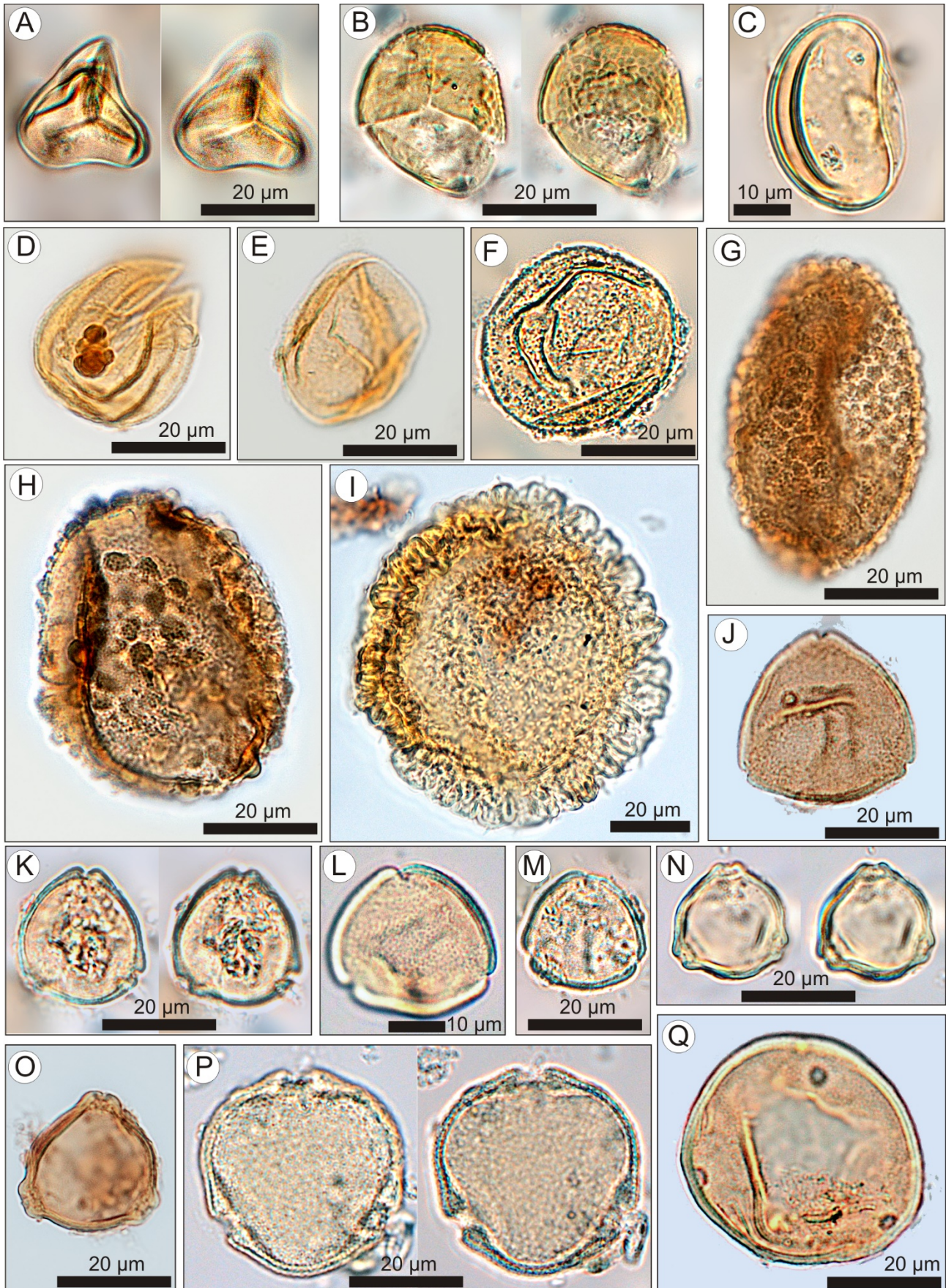






*Abb. 5 (nächste Seite): Ausgewählte Pollen und Sporen aus der Testbohrung (TB) sowie der Forschungsbohrung (FB) im Rohrloh-Maar*

- A: *Leiotriletes neddenioides*  
(Schizaeaceae, Lygodium-Typ, Kletterfarn, FB 57,19 m)
- B: *Lycopodiaceaesporis sp.*  
(Lycopodiaceae, Lycopodium-Typ, Bärlapp, FB 57,19 m)
- C: *Laevigatosporites haardti*  
(Polypodiaceae, Tüpfelfarn, FB 17,39 m)
- D: *Inaperturopollenites hiatus*  
(Cupressaceae, TB 2,25 m)
- E: *Inaperturopollenites dubius*  
(Cupressaceae, TB 2,25 m)
- F: *Inaperturopollenites concedipites*  
(Cupressaceae, FB 20,19 m)
- G, H: *Sciadopityspollenites tuberculatus*  
(Sciadopitys, Schirmtanne, TB 2,25 m)
- I: *Zonalapollenites spinosus*  
(Tsuga, Hemlocktanne, TB 3,85 m)
- J, K: *Triatriopollenites rurensis*  
(Myricaceae, Gagelstrauchgewächs, J: TB 2,25m, K: FB 17,39 m)
- L, M: *Momipites punctatus*  
(Engelhardia, L: TB 3,85m, M: FB 17,39 m)
- N, O: *Trivestibulopollenites betuloides*  
(Betula, Birke, N: FB 20,19m, O: TB 2,25 m)
- P: *Intratropollenites instructus*  
(Malvaceae, Tilia, Linde, FB 41,59 m)
- Q: *Caryapollenites simplex*  
(Carya, Hickory, TB 3,85 m)





*Abb. 6 (nächste Seite): Ausgewählte Pollen und Algen aus der Testbohrung (TB) sowie der Forschungsbohrung (FB) im Rohrloh-Maar*

- A: Polyporopollenites undulosus  
(Ulmaceae, Ulmus/Zelkova, FB 33,19 m),*
- B, C: Tricolpopollenites microhenrici  
(Fagaceae, Quercus-Typ, FB 17,39 m)*
- D: Tricolpopollenites liblarensis  
(Leguminosae, Fagaceae, FB 14,59 m)*
- E, F: Tricolporopollenites cingulum oviformis  
(Castanea-Typ, Fagaceae, E: FB 14,59 m, F: TB 2,25 m)*
- G., I, J: Tricolporopollenites cingulum fusus  
(Castanea-Typ, Fagaceae, G: TB 3,85 m, H, I: FB 14,59 m)*
- H: Platanipollis ipelensis  
(Platanus, Platane, TB 2,25 m)*
- K: Caprifoliipites viburnoides  
(Caprifoliaceae, Geißblattgewächs, TB 2,25 m)*
- L, M: Tricolporopollenites pseudocruciatus  
(Fagus-Typ, Buche, L: FB 20,19 m, M: FB 35,19 m)*
- N: Nyssapollenites kruschii  
(Nyssa, Tupelobaum, FB 14,59 m)*
- O: Tricolporopollenites pseudocingulum  
(Fagaceae, FB 14,59 m)*
- P: Tricolpopollenites asper  
(Quercus, Eiche, FB 20,19 m)*
- Q, R: Tetracolporopollenites sapotoides  
(Sapotaceae, Sapotengewächs, FB 14,59 m)*
- S: Ericipites callidus  
(Ericaceae, Calluna-Typ, Besenheide, FB 27,19 m)*
- T: Botryococcus  
(Süßwasseralge, TB 2,25 m)*

