

INAUGURAL-DISSERTATION

zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät
der
Ruprecht-Karls-Universität
Heidelberg

vorgelegt von
Diplom-Mineraloge Frank Ellminger
aus Ludwigshafen/Rhein

2001

**Sedimente als Ausdruck anthropogener und natürlicher
Umweltveränderungen:
Nussbaumer See und Bodensee-Gnadensee**

Gutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. German Müller
Prof. Dr. Volker Schweizer

Tag der Disputation: 20.12.2001

Danksagung

Mein Dank gilt in besonderem Maße meinem Doktorvater Prof. Dr. Dr. h.c. mult. G. Müller für die Betreuung der Arbeit und die ständige Diskussionsbereitschaft. Zu Dank verpflichtet bin ich auch den Antragsteller des DFG-Projektes, den Herren Dres. H. Schlichtherle, A. Hasenfratz und H. Geisser.

Für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und die netten Abende nach getanem Tagwerk will ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen in Hemmenhofen, Frauenfeld und Heidelberg bedanken. Hervorgehoben sei dabei die Zusammenarbeit mit den anderen Mitarbeitern des Projektes, vor allem mit meinem „erdwissenschaftlichen“ Kollegen Richard Vogt, und deren Interesse an meiner Tätigkeit. Für wertvolle Literaturhinweise, fachliche Diskussionen und stetes Interesse an meiner Arbeit danke ich Gerd Schröder und Tinus Wessels.

Für viele Diskussionen, technische und tatkräftiger Unterstützung, sowie viel Spaß bei den ersten Bohrungen gilt mein besonderer Dank Gillian Wallace und Hubert Blum, der auch das für die Einmessung der Probenahmepunkte notwendige Computerprogramm zur Verfügung stellte. Bei den Laborarbeiten erhielt ich viele gute Tips und wertvolle Unterstützung von Silvia & Stefan Rheinberger und von Dr. Hans-Peter Meyer, der die RFA-Messungen durchführte.

Für die logistische Unterstützung bei den Geländearbeiten danke ich dem DLRG, dem Strandbadpächter und dem Hafenmeister von Horn sowie dem Wassersportverein Markelfingen. Den Herrn W. Tanner und M. Wehrli sei für die Unterstützung bei der Probenahme im Gnadensee gedankt. Michael Wehrli führte auch die Pollenanalyse an Kernen aus dem Nussbaumer See und an den Kernen aus dem Gnadensee durch. Gedankt sei auch Herrn Dr. M. Rösch für die Diskussion der Pollendiagramme. Dr. J.N. Haas analysierte die Pollen in Kern NBS L2 und weiterer Lokalitäten. Bei Dr. Michel Magny möchte ich mich für die Einführung in die Partikelanalyse bedanken. Eva DeHaas sei für die Korrektur des englischen „abstract“ gedankt, Leo Möwius danke ich für gute Tips bei meinen Computerproblemen.

Allen meinen Freunden sage ich Dank für den Rückhalt und den notwendigen „Freizeitausgleich“. Wichtige Anregungen zu meinem Manuskript gaben mir Anja Reuter (Sprache) und Christian Scholz (Inhalt). Ihnen schulde ich auch ein großes Dankeschön für viel Motivation und fruchtbare Diskussionen über die wissenschaftliche Arbeit an sich.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für Sponsoring, Interesse und „Begleitung“. Last but not least danke ich meiner Lebensgefährtin Erika Möwius, die mich in der schwierigen Zeit mit allen ihr zur Verfügung stehenden Mitteln unterstützte.

Zusammenfassung

Es wurden 13 Bohrkerne aus Transekten senkrecht zur Uferlinie des Nussbaumer Sees und des Bodensee-Gnadensees sedimentologisch, geochemisch und mineralogisch untersucht. Der Schwerpunkt lag dabei auf dem Zeitraum zwischen 1000 und 3000 BP cal. Im Bodenseegebiet wurden erstmals die an Macrophyten gebildeten Kalkkonkretionen als Wasserspiegelindikatoren verwendet.

Hinweise auf anthropogenen Einfluß des Menschen auf den Nussbaumer See gibt es in Form von allochthonem Eintrag. Dieser wurde für den Zeitraum zwischen ca. 2700 und 2500 BP cal belegt. Der Übergang vom natürlichen Allochthoneintrag durch den Wasserspiegelanstieg ist dabei nicht vom anthropogen verursachten abzugrenzen.

In den Sedimenten des Gnadensees wurden Indizien für anthropogen verursachten allochthonen Eintrag für die Zeiten 1600 BP cal und zwischen 1400 und 1500 BP cal gefunden.

In keinem der beiden Seen konnte eine Anreicherung von Nährstoffen in den Sedimenten belegt werden. Ebenso wenig wurde für die untersuchten Zeiten eine anthropogen verursachte Anreicherung von Schwermetallen festgestellt. Dies wird durch geringen Eintrag (keine nachweisbare Verhüttungstätigkeit) und starke Verdünnung von Metallgehalten durch die Sedimente erklärt.

Für den Nussbaumer See konnte ein Seespiegelanstieg um 2750 BP cal nachgewiesen werden. Der Wasserspiegel blieb auf diesem hohen Niveau bis ca. 2200 BP cal, wobei ein noch höherer Wasserpegel mit einem anschließenden (50jährigem?) Rückgang auf den Ausgangswert für die Zeit um 2500 BP cal wahrscheinlich ist.

Am Bodensee-Gnadensee erschweren Größe des Sees sowie jahreszeitliche Wasserstandsschwankungen die Rekonstruktion säkularer Seespiegelschwankungen. Das Bohrtransekt aus dem Gnadensee lieferte Hinweise für einen tiefen Seespiegel während der Zeit 1800-2500 BP cal.

Abstract

In the Gnadensee, a part of Lake Constance (South Germany), and Lake Nussbaumen (Northern Switzerland) we took 13 cores in a line perpendicular to the shore. The cores have been investigated with sedimentological, mineralogical and geochemical methods. For our project the most interesting time period was between 1000 and 3000 BP cal. For the first time in the Lake Constance area I used carbonate concretions formed by macrophytes to reconstruct lake levels.

For the time period between approximately 2700 and 2500 BP cal I found hints of human impact on Lake Nussbaumen in form of allochthonous input. There is no difference between allochthonous input caused by a rise of the lake level and the following allochthonous input caused by human influence.

Allochthonous input caused by human activity in the sediments of the Gnadensee is likely in the time around 1600 BP cal and for the period between 1400 and 1500 BP cal.

In the sediments of neither one of the lakes could any nutrient enrichment (P, K, Na) be registered. Neither could I find any anthropogenic caused enrichment of heavy metals in the examined part of the sediment cores. This could be explained by the negligible input (no ore smelting activities) and heavy dilution by the sediments themselves.

The lake level of Lake Nussbaumen rose around 2750 BP cal. The water level kept its high level until approximately 2200 BP cal. The water table probably rose around 2500 BP cal for a period of 50 years after which it fell to the (already relatively high) previous lake level.

The reconstruction of lake levels of the Gnadensee (and therefore of Lake Constance) is quite difficult because of the size of Lake Constance and its annual changes in the water level. In the sediment cores of the Gnadensee there was a hint of a lower lake level during the time period between 1800 and 2500 BP cal.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Rahmen und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	1
1.2	Das Untersuchungsgebiet	3
1.2.1	Geographische Lage, Probeentnahmepunkte und Klima	3
1.2.2	Geologie	6
1.2.3	Hydrologie	8
1.2.3.1	Nussbaumer See	8
1.2.3.2	Bodensee-Untersee	9
1.3	Bisherige Untersuchungen	10
1.4	Archäologischer Hintergrund	10
1.4.1	Nussbaumer See	11
1.4.2	Bodensee-Untersee	12
1.4.3	Fazit	14
2	Ergebnisse	15
2.1	Beschreibung der Bohrprofile	15
2.1.1	Nussbaumer See	16
2.1.2	Bodensee-Gnadensee	24
2.1.3	Diskussion und Zusammenfassung	30
2.2	Magnetische Suszeptibilität, Datierungen und Sedimentakkumulationsraten	31
2.2.1	Nussbaumer See	32
2.2.1.1	Suszeptibilität	32
2.2.1.2	Datierungen	32
2.2.1.3	Sedimentakkumulationsraten	35
2.2.2	Bodensee-Gnadensee	36
2.2.2.1	Suszeptibilität	36
2.2.2.2	Datierungen	37
2.2.2.3	Sedimentakkumulationsraten	39

2.2.3	Diskussion und Zusammenfassung	39
2.2.3.1	Magnetische Suszeptibilität	39
2.2.3.2	Datierungen	40
2.2.3.3	Sedimentakkumulationsraten	42
2.3	Partikelanalyse	46
2.3.1	Nussbaumer See	46
2.3.2	Bodensee-Gnadensee	52
2.3.3	Diskussion und Zusammenfassung	54
2.4	Röntgendiffraktometrie	60
2.4.1	Nussbaumer See	60
2.4.2	Bodensee-Gnadensee	65
2.4.3	Diskussion und Zusammenfassung	67
2.5	Sedimentchemismus	74
2.5.1	Nussbaumer See	78
2.5.2	Bodensee-Gnadensee	96
2.5.3	Diskussion und Zusammenfassung	108
3	Diskussion	117
3.1	Anthropogene Einflüsse	117
3.1.1	Theoretischer Hintergrund	117
3.1.2	Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf anthropogene Sedimentbeeinflussung	118
3.2	Seespiegelschwankungen	124
3.2.1	Theoretischer Hintergrund	124
3.2.2	Interpretation	127
3.3	Vergleich der Sedimentationsgeschichte	130
3.4	Vergleich mit anderen Seen	132
4	Ausblick	135
5	Literaturverzeichnis	136

6	Anhang	147
6.1	Methodik	147
6.1.1	Probenahme	147
6.1.2	Magnetische Suszeptibilität	148
6.1.3	Rasterelektronenmikroskopie (REM)	148
6.1.4	Partikelanalyse	149
6.1.5	Röntgendiffraktometrie	153
6.1.6	Glühverlust	154
6.1.7	Karbonatbestimmung	155
6.1.8	Kohlenstoff- und Schwefelmessungen	156
6.1.9	Haupt- und Spurenelementanalysen	156
6.2	Tabellen	159
6.2.1	Daten der Bohrkerne	159
6.2.2	Probentiefen	160
6.2.3	Altersmodelle	162
6.2.4	Haupt- und Spurenelemente	163
6.2.5	Glühverlust (LOI), Karbonatgehalt, Gesamtkohlenstoff und Schwefel	166

Abkürzungsverzeichnis und wichtige Angaben zum Verständnis

- a: Jahre, meist in Verbindung mit BP oder BP cal
- AMS: accelerator mass spectrometry; Methode der ^{14}C -Altersbestimmung an Proben mit geringer Masse
- BC/AD: vor Christus/nach Christus (Before Christ/Anno Domini)
- BP: (Jahre) Before Present d.h. „Jahre vor 1950“ (WAGNER 1995), ohne weiteren Zusatz werden darunter ^{14}C -Jahre verstanden
- BP cal: Tatsächliche (Sonnen)Jahre vor 1950, ^{14}C -Alter werden auf Basis der Dendrochronologie kalibrierte
- C_{org} : organischer Kohlenstoffgehalt, errechnet aus dem Gesamtkohlenstoff abzüglich dem im CaCO_3 gebundenen Kohlenstoff. C_{org} mit dem Faktor 2 multipliziert sollte den LOI-Wert ergeben.
- $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$: Gesamteisen als Fe_2O_3 ausgedrückt
- u. GOK: unter Geländeoberkante = unter Sedimentoberfläche
- LE: Lithologische Einheit, Zusammenfassung von Schichten mit ähnlichen Merkmalen
- LOI: Loss Of Ignition = Glühverlust bei 560°C , entspricht hier dem Gehalt an organische Substanz
- m ü. M.: Meter über dem Meer; Angabe der absoluten Höhe im schweizer Höhensystem mit Bezugspunkt an der Adria (Höhenunterschied zum deutschen System nach BRAUN & SCHÄRPF 1994: + 0,32 m)
- m ü. NN: Meter über NormalNull; Angabe der absoluten Höhe im deutschen Höhensystem mit Bezugspunkt an der Nordsee
- RPZ: Regionale Pollen Zone, für den Bodenseeraum z.B. von RÖSCH (1997) aufgestellt

Zur Angabe der Probentiefe wird immer die Probenunterkante genannt. Dies hat den Vorteil, dass in den Abbildungen klar ist, welche Schicht die Probe repräsentiert. In einem durchgehend beprobten Kern gelten die Werte der jeweils unteren Probe zwischen den zwei Probenahmepunkten. Probenmächtigkeit meist 2 cm, in Kapitel 6.2.2 im Anhang nachzusehen.

1 Einführung

1.1 Rahmen und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Die hier vorgelegte Arbeit ist Teil des Projektes „Wandel von Landschaft und Siedlungsweise im Übergang vom Subboreal zum Subatlantikum im Bodenseeraum“ des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg und der Kantonsarchäologie Thurgau. Dieses Projekt wird gefördert durch den schweizerischen National Fond und durch die DFG im Rahmen des SPP „Wandel der Geobiosphäre während der letzten 15.000 Jahre - terrestrische Sedimente als Abbild sich verändernder Umweltbedingungen“. Den genannten Institutionen sei an dieser Stelle für ihre finanzielle und logistische Unterstützung gedankt.

Ein Ziel des Projekts von Landesdenkmalamt und Kantonsarchäologie ist die Rekonstruktion der Seespiegelschwankungen im Subboreal und Subatlantikum, insbesondere des Übergangs beider Chronozonen und ihre Beziehung zu Siedlungsverlagerungen.

Ein zweiter Schwerpunkt liegt auf der Gewinnung detaillierter Daten zum Wandel von Klima und Vegetation im genannten Zeitabschnitt. Hier sind vor allem auch anthropogene Faktoren zu berücksichtigen. Es soll der Versuch unternommen werden, Klimawandel, Landschaftsveränderung, Siedlungsverlagerung und Wirtschaftswandel im Zusammenhang zu verstehen.

Untersuchungsgebiet ist neben dem Bodensee die nur 10 km entfernte Nussbaumer Seenplatte. Vorhandene Daten (s.a. Kap. 1.3) und die neuen Untersuchungen des Projektes sollen so aufeinander abgestimmt werden, dass die Ergebnisse vom westlichen Bodensee denen der Nussbaumer Seenplatte gegenübergestellt werden können. Gerade der Vergleich des großen, vorwiegend aus den Alpen gespeisten Voralpensees mit einer Gruppe von Kleinseen verspricht weitergehende Einsichten bezüglich natürlichem und anthropogen bedingtem Landschaftswandel sowie der Siedlungsweise.

Die Stratigraphien der untersuchten Seen wurden im Rahmen des Projekts pollenanalytisch ausgewertet und radiometrisch und soweit möglich auch dendrochronologisch datiert. Dies war eine wichtige Voraussetzung für die sedimentologische Bearbeitung.

Ziel der hier vorgelegten Arbeit war zunächst, zu klären, ob es einen anthropogenen Einfluss auf die Sedimentation während der Bronze- und Eisenzeit gab und wenn ja, in welcher Form. Dazu

sollten zum einen Nährstoffe, die im Zuge einer anthropogen bedingten Eutrophierung in die Sedimente gelangen, zum anderen Schwermetalle aus der Metallverarbeitung, nachgewiesen werden. Wichtig war in diesem Zusammenhang die Nähe der Probenahmepunkte zu den archäologisch belegten Siedlungsplätzen.

Des Weiteren sollte der terrestrische Eintrag in die Seen nachgewiesen werden. Dieser kann sowohl anthropogene wie auch natürliche Ursachen haben.

Es galt anthropogene Einflüsse von natürlichen Veränderungen, z.B. klimatischen, im Sedimentationsgeschehen zu unterscheiden. Ein Indiz für klimatische Veränderungen sind Seespiegelschwankungen, die hier mittels Sedimentstratigraphie und Analyse der Kalkkonkretionen nachgewiesen werden sollten. Steigen bzw. fallen die Wasserspiegel von Seen mit hydrologisch ähnlichem Regime in einer größeren Region (z.B. im Alpenvorland), so ist eine klimatische Ursache anzunehmen (YU 1996).

Mögliche Eutrophierung, terrestrischer Eintrag und Seespiegelbewegungen ergeben zusammen einen wichtigen Einblick in die Landschaftsveränderung.

Im Laufe der Arbeit zeigte sich, dass zunächst Grundlagen in Form einer allgemeinen sedimentologischen, petrologischen und geochemischen Charakterisierung des Sedimentinventars der Flachwasserzone beider Seen geschaffen werden mussten. Auf der Basis dieser Charakterisierung konnten Hinweise zur Genese der verschiedenen Sedimente gesammelt werden.

Abschließend sollten die Sedimente beider Seen miteinander und mit anderen Seen verglichen werden. Erster Vergleich sollte die Ähnlichkeiten und Unterschiede der Sedimente zwischen dem kleinen Nussbaumer See mit lokalem Einzugsgebiet und dem großen Bodensee mit einem Einzugsgebiet bis in die Alpen herausarbeiten. Der Vergleich mit anderen Seen sollte der überregionalen Einordnung der Ergebnisse dienen.

1.2 Das Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst den Nussbaumer See sowie mit dem Gnadensee einen Teil des Bodensee-Untersees (Abbildung 1).

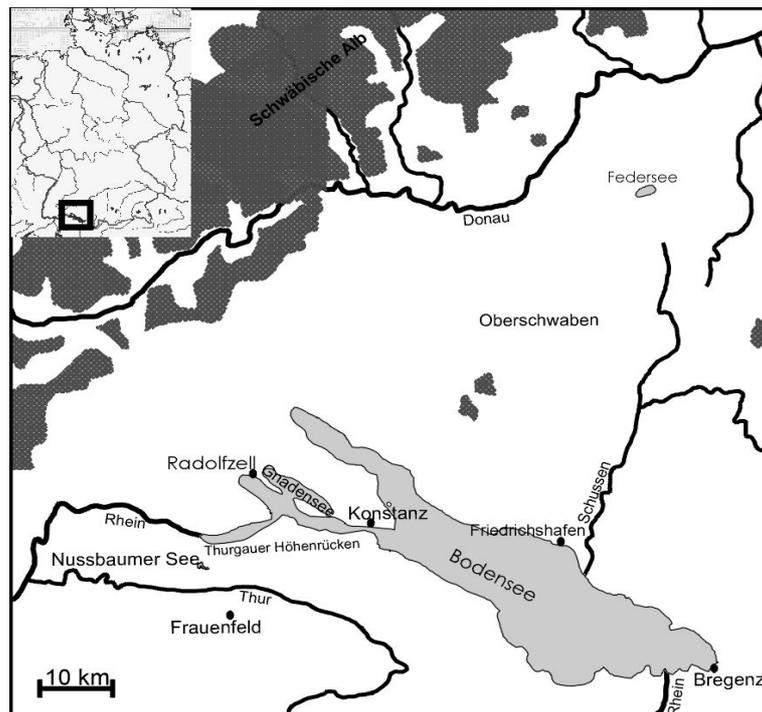


Abbildung 1: Karte der Lage der Probenahmegebiete. Zur Lage der einzelnen Probenahmepunkte siehe Abbildung 2 und 3.

1.2.1 Geographische Lage, Probeentnahmepunkte und Klima

Die Gruppe der Nussbaumer Seen, bestehend aus Hasensee, Hüttwiler und Nussbaumer See, liegt im Seebachtal, Kanton Thurgau, Nordostschweiz. Im Norden wird das Seebachtal durch den über 600 m hohen Stammerberg vom Rheintal, im Süden durch einen ca. 500 m hohen Höhenzug vom Thurtal getrennt. Der Nussbaumer See liegt auf einer Höhe von 434 m ü. M. (entspricht 433,68 m ü. NN, Höhendifferenz zwischen Deutschem und Schweizer Höhensystem nach BRAUN & SCHÄRPF 1994: $X \text{ m ü. NN} + 0,32 \text{ m} = Y \text{ m ü. M}$, alle weiteren Höhenangaben bezüglich des

Nussbaumer Sees nach dem Schweizer Höhensystem in m ü. M., deutsche Höhenangaben in m ü. NN), die hier untersuchten Bereiche befinden sich maximal 1,75 m darüber.

Die Probenahmelokalitäten am Nussbaumer See sind Abbildung 2 zu entnehmen. Die Koordinaten aller Bohrpunkte sind in Kapitel 6.2.1 aufgelistet.

Der Gnadensee ist ein weitgehend abgeschlossener Teil des Bodensee-Untersees (Abbildung 1).

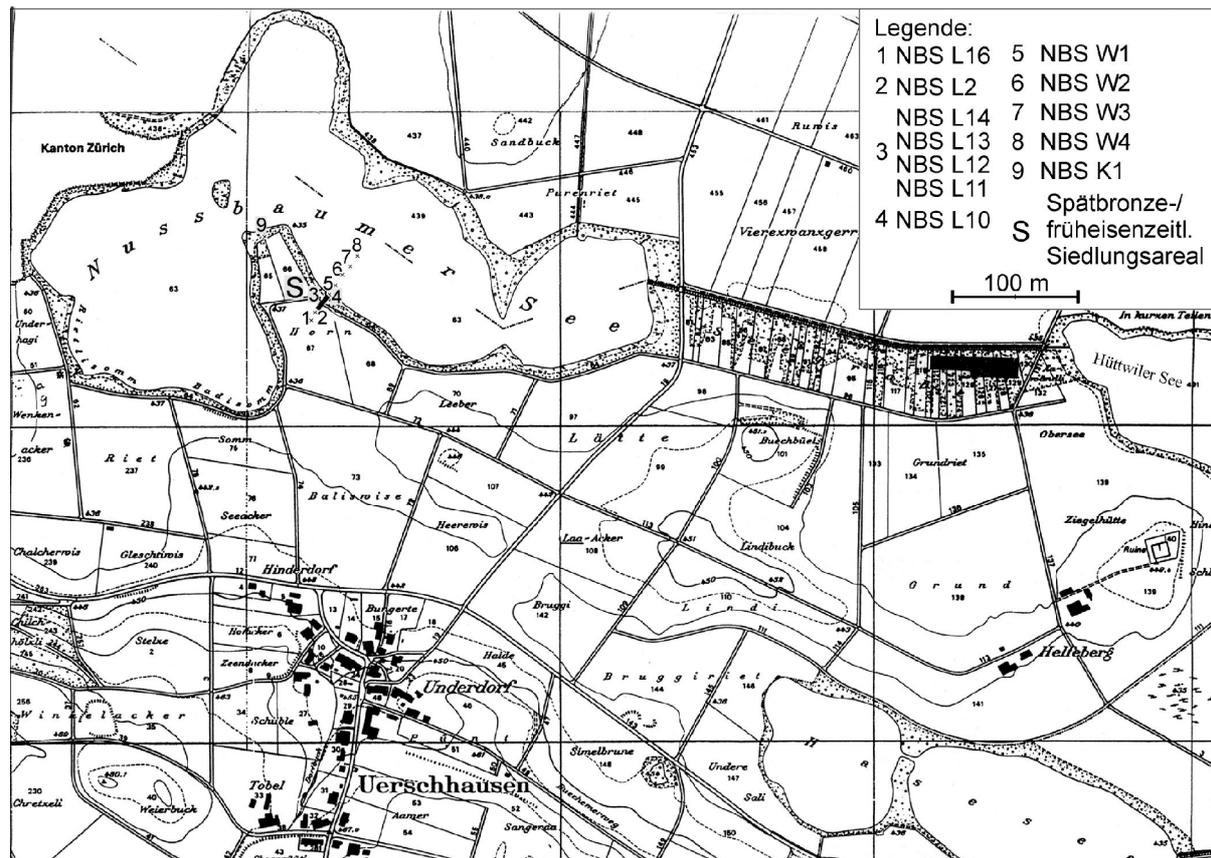


Abbildung 2: Der Nussbaumer See mit der Lage der Probenahmepunkte

Dieser langgestreckte, nordwest-südost orientierte See wird im Nordosten vom bis zu 680 m ü. NN hohen Bodanrück, im Südwesten von der Halbinsel Mettnau und der durch einen Damm mit dem Festland verbundenen Insel Reichenau begrenzt (Abbildung 3). Zwischen der Halbinsel Mettnau und der Insel Reichenau ist der Gnadensee über eine Untiefe mit dem Zeller See verbunden.

Die Probenahmepunkte im Gnadensee liegen im Markelfinger Winkel (Abbildung 3, Bohrkern Gn1-6) und vor Oberzell (Bohrkern Gn7).

Das aktuelle Klima am Nussbaumer See bzw. im ganzen Seebachtal ist mit 850 mm Jahresniederschlag für den Bodenseeraum vergleichsweise trocken (RIMATHÉ 1987, HANDBUCH

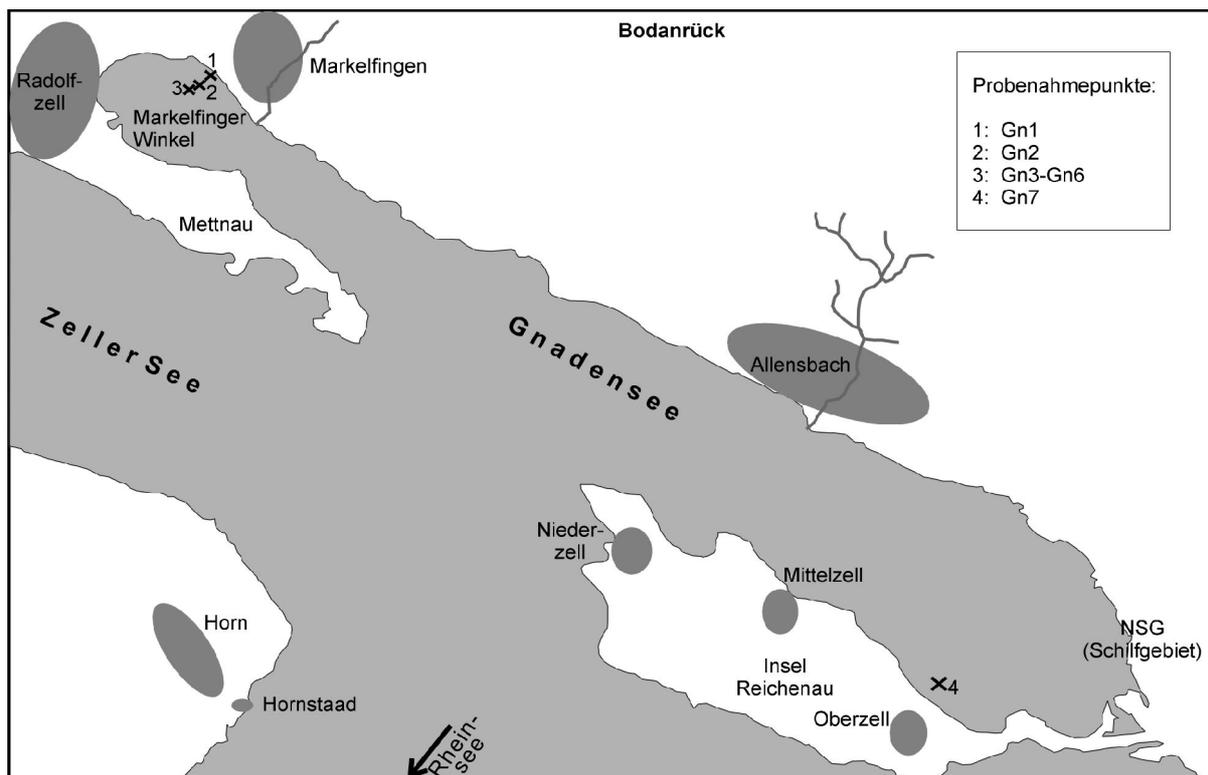


Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Bodensee-Untersee mit Probenahmelokalitäten. Ortschaften sind grau unterlegt. 1:110.000

HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990), die Juli-Durchschnittstemperatur liegt bei 18°C, die von Januar bei -1°C (RIMATHÉ 1987). Das Lokalklima im Seebachtal variiert stark: der südexponierte Hang ist warm und trocken (Wein- und Tabakanbau möglich). Der Talgrund hingegen ist feucht und kühl mit häufiger Nebelbildung. Dieses Phänomen ist durch Kaltluftseen, die sich aufgrund des vor Großwindlagen geschützten Tales häufig bilden können, zu erklären (RIMATHÉ 1987). In verschiedenen Bereichen des Untersees unterscheiden sich die mittleren Jahresniederschläge aufgrund der Stauwirkung des Thurgauer Höhenrückens: in Radolfzell und auf der Insel Reichenau (relevant für den Gnadensee) betragen die Jahresniederschläge 754 bzw. 801 mm pro Jahr, in Steckborn und Kreuzlingen 893 bzw. 946 mm/Jahr (WAIBEL 1968). Somit sind die Niederschlagsmengen im Bereich des Gnadensees, im Vergleich zum Seebachtal, etwas geringer. Die Durchschnittstemperatur beträgt im Juli 18°C und im Januar -1°C (WAIBEL 1968). Die lokalen Temperaturunterschiede sind gering, da das Wasser temperaturnausgleichend wirkt.

Im Herbst wird vom See Wärme abgegeben, d.h. das Wasser ist wärmer als die Luft und es kommt häufig zur Nebelbildung. Dieser wirkt zusätzlich temperaturnausgleichend, da er tags die Erwärmung und nachts die Auskühlung stark abschwächt. Im Frühjahr verzögert der kalte Wasserkörper die Erwärmung des Bodenseegebietes (WAIBEL 1968). Starkwindereignisse treten am Bodensee in den Winter- und Frühjahrsmonaten häufiger auf als im Sommer und Herbst, dabei wird Sturmstärke nur in Böen, nicht aber im Stundenmittel erreicht (MÜHLEISEN 1977).

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Daten kann man sagen, dass beide Seen ein ähnliches (Lokal-)Klima haben.

1.2.2 Geologie

Zunächst sei nochmals auf die unterschiedlichen Höhenangaben für das Schweizer und das Deutsche Gebiet hingewiesen.

Zur Altersangabe in BP bzw. BP cal siehe Abkürzungsverzeichnis.

Die heutige Landschaft des gesamten Bodenseegebiets ist durch die glaziale Überformung während der letzten Eiszeiten geprägt. Die Geologie um den Nussbaumer See und den Untersee besteht folglich aus quartären Elementen. Details zum Nussbaumer See können dem Blatt 1052 Andelfingen des Geologischen Atlas der Schweiz entnommen werden. Eine gute Übersicht der Geologie des Bodensee-Untersees bietet die geologische Karte 1:50.000 von Baden- Württemberg, Blatt Hegau und westlicher Bodensee. Weitere Details werden in den Blättern Singen, Hohentwiel (8219), Öhningen (8319), Überlingen-West (8220) und Konstanz-West (8320) der Geologische Karte 1:25.000 von Baden-Württemberg dargestellt.

Im Folgenden soll die Entstehung des Untersuchungsgebiets kurz beschrieben werden. Ausführliche Darstellungen finden sich bei HANTKE 1980, E. MÜLLER 1979, 1982 (Eisaufbauprozesse), 1995 und bei SCHREINER 1968, 1992 a.

Die quartären Bildungen im Untersuchungsgebiet liegen tertiären Molassebildungen auf (zum Nussbaumer See nächster Aufschluß am Stammerberg, zum Bodensee-Untersee sowohl am Bodanrück (NE-Flanke) als auch am Schiener Berg aufgeschlossen). Die Molasse - meist Sande - war zur Zeit der Würmvereisung bereits im Zuge der vorherigen Vereisungen vorgeformt. Das

in der Molasse vorgeformte Landschaftsbild wurde während der Würmeiszeit durch den Bodensee-/Rheingletscher neu überprägt.

In der Nähe der Nussbaumer Seen wurden während einer Warmphase des Frühwürms die Ittinger Schotter geschüttet. Sie sind aufgrund der Grundwasseraufstöße im Ostbecken des Nussbaumer Sees für die vorliegende Untersuchung interessant. Die Grundwasseraufstöße zeigen einen Kieskörper im Liegenden der Moränenbedeckung unter dem Nussbaumer See an, der aufgrund der stratigraphischen Lage mit den Ittinger Schottern zu parallelisieren ist (E. MÜLLER 1979). Das bedeutet, dass der Untergrund der Nussbaumer Seen im Frühwürm abgelagert wurde.

Zur Zeit der maximalen Eisausbreitung der Würmeiszeit reichte die in mehrere Lappen unterteilte Eisfront bis nach Andelfingen (Thurtallappen), Stammheim (Seebachtallappen) und bis in den Hegau (Hegaulappen E. MÜLLER 1979). Während des Stadiums von Stein am Rhein (ca. 16.000-17.000 BP) wurden die Endmoränen, welche die Nussbaumer Seen einrahmen, abgelagert (HOFMANN 1967, E. MÜLLER 1979 und HANTKE 1980). Der Nussbaumer See ist somit als Zungenbeckensee anzusprechen.

Der im Becken des heutigen Nussbaumer Sees endende Seebachtallappen des Bodensee-/Rheingletschers zerfiel während der ersten Rückschmelzstadien (HANTKE 1980, 2. bis 3. Rückschmelzphase E. MÜLLER 1979).

In dem freigewordenen Zungenbecken bildete sich ein größerer See (E. MÜLLER 1979, 1995), aus dem später die drei Nussbaumer Seen hervorgingen. Die Sedimentation von Seeton setzte wahrscheinlich noch während des Abschmelzens des Gletschers ein. Der höchste nachweisbare Seepegel lag bei 441 m ü. M. (E. MÜLLER 1979, 1995); RÖSCH (1983) gibt aufgrund von stratigraphischen und palynologischen Untersuchungen für die Zeit um 14.500 BP cal (Pollenzone Ia a4) eine Absenkung um 5 m an.

Das Bodenseebecken ist durch fluviatile und glaziale Erosion entstanden (SCHREINER 1968, 1979). Im Untersee folgte die Erosion älteren Bruchlinien. Möglicherweise wurde die Beckenbildung durch geringe tektonische Absenkung während des Quartärs verstärkt (SCHREINER 1968, 1979). Eisfrei wurde das heutige Unterseegebiet während der Eisrandlagen 8 und 9 („Konstanzer Stadium“, ¹⁴C-Alter 14100 BP SCHREINER 1992 a, entspricht ca. 17.000 BP cal). Die Becken und Schmelzwasserrinnen wurden während des Spät- und Postglazials mit Geröll, Sand und Ton bis annähernd zur heutigen Seetiefe verfüllt. Im Liegenden der holozänen Sedimentschicht unter dem

Untersee steht meist Becken- bzw. Bänderton mit Mächtigkeiten zwischen 50 und 110 m an (SCHREINER 1992 a). Am Untersee bei Radolfzell beträgt die gesamte Sedimentmächtigkeit 200 m (SCHREINER 1992 a).

Die bekannte nacheiszeitliche Pegelentwicklung des Bodensees läßt sich wie folgt darstellen: Nach dem Abschmelzen des Gletschers hatte der Bodensee zunächst eine Wasserspiegelhöhe von 405-410 m ü. NN (SCHMIDLE 1942, SCHREINER 1992 a), die bis mindestens 14500 BP bestand und sich langsam durch Erosion der Endmoränen bei Stein am Rhein auf das heutige Niveau absenkte (KELLER 1994). Schmidle (1942) geht aufgrund archäologischer Funde von einem Seepegelstand von 398 m ü. NN um 7000 BP aus. Die Wasserstände konnten von den vorgenannten Autoren anhand von Uferterrassen und kleinen Kliffbildungen rekonstruiert werden.

1.2.3 Hydrologie

Da Größe, Wassertiefe, Durchflussrate, Größe des Einzugsgebietes und Seetypus Einfluß auf die Sedimentbildung und -ablagerung haben, soll hier ein Überblick über diese „Kenngrößen“ der beiden untersuchten Seen gegeben werden.

1.2.3.1 Nussbaumer See

Der Nussbaumer See hat eine Wasseroberfläche von 0,25 km², die sich auf das westliche (0,099 km²), mittlere (0,115 km²) und östliche Becken (0,039 km² SCHNEGG 1995) verteilt. Die Becken sind zwischen 3,5 und 8 m tief (SCHNEGG 1995); das mittlere Becken, in dem die Probenahme für die vorliegende Untersuchung stattfand, ist mit 8 m das tiefste. Der Mittelwasserstand liegt bei 434 m ü. M. (RIMATHÉ 1987); vor der Absenkung im Jahr 1944 lag er bei 435,5 m ü. M. (GOLLNISCH-MOOS 1999). Die Höhe des Wasserspiegels schwankt im Jahresverlauf um ungefähr 0,8 m (TANNER 1913 in RÖSCH 1985). Das Einzugsgebiet des Nussbaumer Sees umfaßt 5,9 km² (RIMATHÉ 1987).

Größter Zufluss in den See ist der Furtbach, der in das östliche Seebecken mündet, in dem sich auch der Seeausfluss befindet. Somit beeinflusst der Furtbach nicht die Probenahmenstellen im mittleren Seebecken (SCHNEGG 1995). In dieses mittlere Seebecken mündet kein natürlicher Zufluss. Das westliche Becken wird vom Uerschhauser Dorfbach gespeist (heutzutage münden mehrere Entwässerungsleitungen in alle drei Seebecken, SCHNEGG 1995). Einen weiteren

Wasserzufluss stellt der Grundwasseraufstoß im Ostbecken des Sees dar (E. MÜLLER 1979). Es liegen weder Zufluss- noch Abflussraten vor.

Der Nussbaumer See gehört zu den eutrophen Seen (SCHNEGG 1995). Er ist holomiktisch, in Jahren mit Eisbedeckung auch dimiktisch (SCHNEGG 1995). Die Sauerstoffkonzentration im bodennahen Seewasser sinkt vor der Vollzirkulation auf Null (SCHNEGG 1995).

1.2.3.2 Bodensee-Untersee

Der Bodensee hat eine Oberfläche von insgesamt 571,6 km², davon entfallen 71,6 km² auf den Untersee und davon wiederum 16,1 km² auf den Gnadensee (BRAUN & SCHÄRPF 1994). Die mittlere Tiefe des Untersees beträgt 28 m, die des Gnadensees 21,7 m (zum Vergleich: mittlere Tiefe des Obersees 100 m, BRAUN & SCHÄRPF 1994). Die Ufer des Untersees sind 99,1 km lang (BRAUN & SCHÄRPF 1994), die große Länge im Vergleich zur Oberfläche läßt sich durch den verästelten Umriss des Sees erklären.

Das Einzugsgebiet des Bodensees beträgt knapp 12000 km², davon entfallen auf das Gebiet des Alpenrheins 51,5% (HANDBUCH HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990). Die Wasserführung des Alpenrheins ist maßgeblich für den Wasserstand des Bodensees verantwortlich, da der Anteil des Rheins an der gesamten Wasserzufuhr zum Bodensee rund 62% ausmacht (HANDBUCH HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990). Der Seepegel des Bodensees ist demzufolge durch ein winterliches Niedrig- (Januar/Februar) und ein sommerliches Hochwasser (Juni/Juli) mit einem Niveauunterschied von 1,60 m gekennzeichnet (HANDBUCH HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990). Immer wieder kommt es zu außergewöhnlichen Hoch- bzw. Tiefständen des Seepegels. Das letzte „Jahrhunderthochwasser“ trat 1999 mit einem Maximalstand von 397,53 m ü. NN am Pegel Konstanz auf (www.WetterOnline.de/Pegelstände/Bodensee/Konstanz, zum Vergleich mittleres Hochwasser am Pegel Konstanz: 396,56 m ü. NN, HANDBUCH HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990). Das entspricht einem Wasserstand von etwa 397,3 m ü. NN am Untersee. Der mittlere Mittelwasserstand wird für den Untersee (Pegel Berlingen) mit 395,11 m ü. NN angegeben (HANDBUCH HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990).

Generell ist der Bodensee holomiktisch, der Untersee und dort insbesondere der Gnadensee aber in Jahren mit Eisbedeckung dimiktisch (KIEFER 1968, LANG 1990). Die Unterkante der Sprungschicht (Metalimnion) liegt in der Zeit von Mai/Juni bis Herbst bei 30-40 m (LANG 1990). Im

Gnadensee sinkt, anders als in weiteren Teilen des Untersees, der Sauerstoffgehalt in der Nähe des Seegrundes im Herbst, vor der Vollzirkulation, nahe Null (KIEFER 1968). Der Untersee gehört im Gegensatz zum Obersee zum eutrophen Seetypus (KIEFER 1968, zur Eutrophierung und Reoligotrophierung des Obersee s. MÜLLER, G. 1997).

1.3 Bisherige Untersuchungen

Die spätglaziale und frühholozäne Entstehung und eine einfache Stratigraphie der Nussbaumer Seen wird von E. MÜLLER 1979 beschrieben.

RÖSCH hat 1983 die erste umfassende Untersuchung zur Entstehung und Entwicklung der Seen im Seebachtal vorgelegt. Seine Ergebnisse stützen sich in erster Linie auf die pollenanalytische und stratigraphische Untersuchung von 15 Transekten über die Nussbaumer Seenplatte. Ergänzt wurden diese Analysen durch petrologische und geochemische Untersuchungen an einem Bohrkern aus dem Profundal des Ostbeckens des Nussbaumer Sees.

HAAS & HADORN (1998) rekonstruierten die Vegetations- und Kulturlandschaftsgeschichte des Seebachtales ebenfalls mit Hilfe der Palynologie und mit der Makrorestanalyse. Der zu diesem Zweck entnommene Bohrkern aus dem Profundal des mittleren Seebeckens schließt an das in dieser Arbeit besprochene Bohrtransekt an. Anthropogene und natürliche Veränderungen beider Untersuchungen sind somit gekoppelt.

Auf die Ergebnisse der oben genannten Autoren wird jeweils eingegangen.

1.4 Archäologischer Hintergrund

Zum besseren Verständnis des anthropogenen Einflusses auf die Landschaftsentwicklung sollen im Folgenden die archäologischen Kenntnisse über das Seebachtal und den Untersee kurz zusammengefasst werden. Aus diesem Überblick wird deutlich, dass der Mensch seit der ausgehenden Eiszeit im Bodenseeraum anwesend ist. Dabei hat er seine Umwelt in zunehmendem Maße geprägt, d.h. als Jäger und Sammler noch in geringem, als Bauer im Neolithikum dann in größerem Umfang (zu den Zeiten und Kulturen s. Abbildung 4). Man muß wegen der im Laufe

der Zeit stärker werdenden anthropogenen Umwelteingriffe von einer anthropogenen Beeinflussung der Seen und damit ihrer Sedimente für Zeiten nachgewiesener Besiedlung ausgehen.

1.4.1 Nussbaumer See

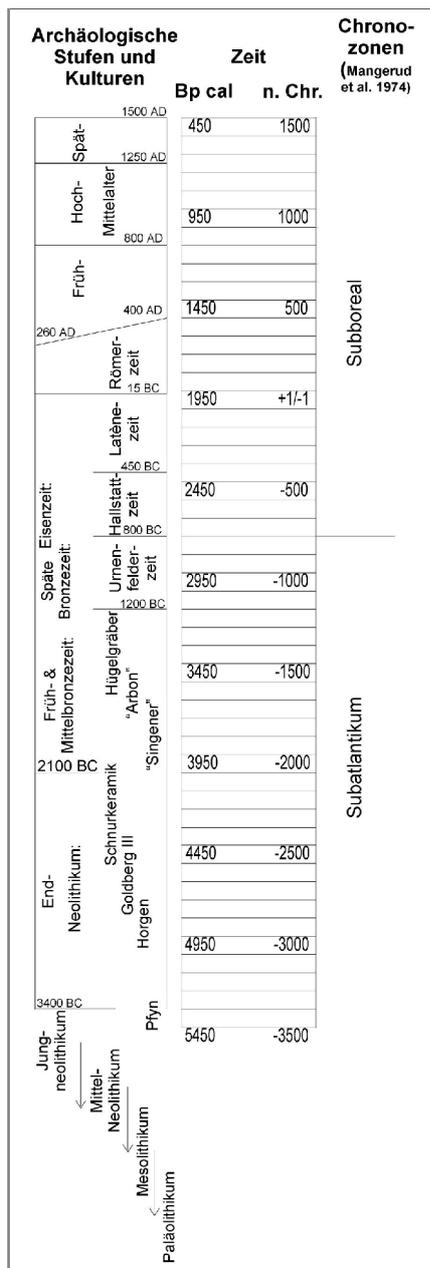


Abbildung 4: Übersicht über archäologische Stufen und Kulturen sowie über die Chronozonen. Verändert nach Strahm (1987) und Billamboz et al. (in Vorber.).

Die frühesten Belege menschlicher Präsenz im Gebiet der Nussbaumer Seen kommen aus den ersten Jahrtausenden der Nacheiszeit (HASENFRATZ 1995).

Acht kleinere Freilandlagerplätze aus dem Mesolithikum sind bekannt, hinzu kommen noch einige Fundstellen aus dem Paläo- oder Mesolithikum, die nicht genauer einzuordnen sind (LEUZINGER 1998).

Vor der Halbinsel im See liegt 2-5,5 m (heute durch die künstliche Seefällung in den 40er Jahren nur noch 0,5-4 m) unter Wasser eine Siedlung der Pfyner Kultur (ca. 5800-5500 BP cal). Im Endneolithikum war die Siedlungsaktivität nur schwach (Horgener und Schnurkeramische Kultur, ca. 5500-4300 BP cal, Funde bzw. ein Grubenhaus auf der Halbinsel), um dann um 4000 BP cal ganz auszusetzen (HASENFRATZ & SCHNYDER 1998).

Eine Besiedlung der Seeufer des Nussbaumer Sees ist wieder für die frühe und mittlere Bronzezeit (ca. 4300-3500 BP cal) zu fassen, die Siedlungen lagen sowohl auf der Halbinsel als auch am gegenüberliegenden Ufer (HASENFRATZ & SCHNYDER 1998).

Auf die späte Bronzezeit (ca. 3200-2700 BP cal) und die frühe Eisenzeit (2700-2500 BP cal) soll genauer eingegangen werden, da dieser Zeitraum auch den Schwerpunkt der sedimentologischen Untersuchungen bildet. Die Darstellung basiert auf GOLLNISCH 1998 und GOLLNISCH-MOOS 1999.

Insgesamt wurden bei den Ausgrabungen in den Jahren 1985-90

45 von etwa 100 Hausgrundrissen aus der spätesten Bronzezeit freigelegt. Es handelte sich um Schwellbauten mit Lehmestrichen. Die Besiedlung dauerte etwa von 2820 BP cal bis 2750 BP cal. Die Häuser verteilten sich auf 3 Baugrundarten unterschiedlichen Nässegehalts bzw. unterschiedlicher Festigkeit: Lehm, Anmoor, Moor. Je nach Baugrund kamen unterschiedliche Substruktionen („Unterkonstruktionen“) zur Anwendung. In der Regel waren dies einfache Schwellenrahmen auf festem Boden bis hin zu leicht abgehobenen Plattformen auf weichen Böden. Die Substruktionen waren speziell zur Gewichtsverteilung und zum Nässeschutz konstruiert. Es existierten jedoch auch auffällige Ausnahmen besonders auf weichen Böden. Die Interpretation und ein eingehender relativchronologischer Datierungsversuch deuten auf eine Vernässung während der Besiedlung hin, was auch durch Lehmestricherneuerungen bei Häusern auf Moorböden bestätigt wurde. Des Weiteren waren bestimmte Reparaturmaßnahmen an den Substruktionen zu erkennen, welche auf eine zunehmende Erweichung des Baugrundes hindeuten. Zu diesen archäologischen Erkenntnissen kommen botanische Torfuntersuchungen durch Frau Dr. Maier (pers. Mittl.), die eine allmähliche Vernässung des Siedlungsplatzes noch während und nicht erst nach der Besiedlung belegen.

Die nächste Siedlungstätigkeit ist dann wieder von 2613 bis 2585 BP cal in Form von mehreren Baustrukturen nachzuweisen. Diese waren nun auf Pfähle gegründet und lagen in dem vom See abgewandten Randbereich der älteren Siedlung.

Nach der eisenzeitlichen Besiedlung sind keine weiteren Siedlungsaktivitäten an den Nussbaumer Seen zu fassen. Lediglich wenige Scherben der späten La-Tène-Zeit bzw. der römischen Periode deuten auf eine gelegentliche Begehung in diesen Zeiten hin, wobei sich die nächste bekannte römische Villa bei Hüttwilen, rund 4 km vom Nussbaumer See entfernt, befand (HASENFRATZ 1995).

1.4.2 Bodensee-Untersee

Zusammenfassende Darstellungen zur Besiedlungsgeschichte wie für den Nussbaumer See liegen für den Bodensee nicht vor. Einen ersten Eindruck vermittelt KIMMIG (1959) für den Bodenseeraum, KELLER & REINERTH (1925) für den Thurgau und WINIGER & HASENFRATZ (1985) für das schweizerische Bodenseeufer.

Erste Belege für die Anwesenheit des Menschen stammen aus dem Magdalénien (KIMMIG 1959, ca.

16000 BP cal). Diese Nachweise kommen nicht direkt vom Bodensee, sondern aus dem Hegau, dem Randen und der Umgebung von Schaffhausen (KELLER & REINERTH 1925, REINERTH 1953), lassen aber auf eine Begehung auch des direkten Bodenseegebietes schließen.

Zahlreiche Lagerplätze aus der Zeit des Mesolithikums finden sich bei 400 m ü. NN am Bodenseeufer (REINERTH 1953) und in der Umgebung von Singen (freundl. mündl. Mitteilung Dr. H. Schlichtherle und Dr. J. Hoffstadt).

Alt- und mittelneolithische Kulturen (ca. 7500-6000 BP cal) besiedelten zunächst Terrassen und Täler, dann dem Seeufer nahe Bereiche (DIECKMANN 1986, 1987, SCHLICHOTHERLE 1990 a, b). Mit dem Mittelneolithikum treten am Bodensee einzelne Scherben auf, die hier auf bisher nicht entdeckte Siedlungen hindeuten (DIECKMANN 1986, 1987). Eine ausgedehnte Siedlung aus der Zeit 6250-6150 BP cal konnte in der Radolfzeller Aachniederung erfasst werden (DIECKMANN 1991).

Betrachtet man die Besiedlung der Seeufer, so zeigen sich Belegungslücken, die nicht ausschließlich auf Fundlücken zurückzuführen sind, sondern eine Siedlungsverlagerung oder einen Siedlungsunterbruch darstellen. Besonders zu nennen sind die Phasen zwischen 4350 und 3850 BP cal (d.h. Becherkulturen bis Frühbronzezeit) und zwischen 3450 und 3050 BP cal (Mittelbronzezeit bis Beginn Spätbronzezeit = Urnenfelderkultur; SCHLICHOTHERLE 1995). Mehrfach zeugen Funde im Umland des Bodensees von einer verlagerten Siedlungstätigkeit (SCHLICHOTHERLE 1985).

Im Folgenden wird die Siedlungsentwicklung im direkten Umfeld des Untersuchungsgebiets Gnadensee beschrieben.

In der Flachwasserzone des Gnadensees liegen zahlreiche Siedlungen der Kulturen des Jung- und Endneolithikums (SCHLICHOTHERLE 1990 b; s.a. Abbildung 4). Urnenfelderzeitliche Ufersiedlungen sind im Gnadensee bisher nicht nachweisbar (nächste Siedlung Wollmatingen-Langenrain, SCHÖBEL 1996). Jedoch weisen im Gewann „Sandäcker“ (in direkter Umgebung der Bohrungen Gn1-Gn6, Abbildung 3) und in Reichenau-Mittelzell (nahe der Bohrung Gn7) Funde und Sondagen spätesturnenfelderzeitliche Siedlungen nach (SCHLICHOTHERLE 1985, 1988, 2001; s.a. Abbildung 4). Die Siedlungsareale müssen sich oberhalb 400 m ü. NN (frühholozäne Kliffkante des Bodensees, heutiger Seespiegel 395 m ü. NN) befunden haben (SCHLICHOTHERLE 1988).

In den Uferzonen des Untersuchungsgebiets direkt finden sich keine hallstattzeitlichen Hinweise

auf die Anwesenheit von Menschen. Die große Anzahl von Grabhügeln im nahen Hinterland (u.a. Bodanrück) weist jedoch anthropogene Aktivitäten um den gesamten Untersee nach (Schlichtherle 2001). Die dem Untersuchungsgebiet am nächsten (ca. 8 km entfernt) sowie seenah gelegenen hallstattzeitlichen Gräber befinden sich in der Gemeinde Moos (freundl. mündl. Mitteilung Dr. B. Dieckmann). Latènezeitliche Funde gibt es am Bodensee wenige (Radolfzell, Insel Reichenau und Konstanz, STATHER 1993).

Die dem Untersuchungsgebiet am nächsten liegenden römischen Siedlungen befanden sich in Konstanz und in Stein am Rhein (BREM 1997, STATHER 1986, 1993); die nächsten römischen Villen lagen auf dem Bodanrück (Schlichtherle 2001).

Die Allamannische Landnahme im 5. Und 6. Jh. ist am Gnadensee durch typischen Ortsnamen (Markelfingen und Wollmatingen mit den Endungen auf „-ingen“) belegt (Schlichtherle 2001).

1.4.3 Fazit

Am Nussbaumer See hatte der Mensch Einfluß auf die Sedimente der Urnenfelder- (hier: ca. 2820-2750 BP cal), der Hallstatt- (hier: ca. 2620-2580 BP cal), der Latènezeit (ca. 2400-1940 BP cal) und möglicherweise die Sedimente der römischen Periode (ca. 1940-1550 BP cal).

Am Bodensee-Gnadensee ist mit den urnenfelderzeitlichen (3000-2750 BP cal), hallstattzeitlichen (ca. 2750-2400 BP cal), römischen (ca. 1940-1690 BP cal) und allamanischen (ca. 1550-1350 BP cal) Befunden ebenfalls die Möglichkeit eines anthropogenen Einflusses auf die untersuchten Sedimente gegeben.

2 Ergebnisse

2.1 Beschreibung der Bohrprofile

Hier soll die makroskopische Ansprache einen Überblick über die gesamte nachgewiesene Stratigraphie geben. Die einzelnen lithologischen Einheiten (LE) wurden für jeden Kern mit römischen Ziffern durchnummeriert (Abbildung 5, 6), die Beschreibung der einzelnen Kerne erfolgt vom Hangenden zum Liegenden, Tiefenangaben werden in Meter unter GOK angegeben. Auf die analytisch bearbeiteten Kernbereiche wird gesondert eingegangen. Am Bodensee wurden häufig die Korngrößen zur Charakterisierung des Sediments und zur Namensgebung herangezogen. Am Nussbaumer See hingegen wurde diese Klassifikation nicht benutzt, weil sich die einzelnen Sedimenttypen in ihren bei der optischen Ansprache feststellbaren Korngrößenverteilungen nur gering unterscheiden.

Zunächst eine Übersicht über die häufigsten Sedimenttypen:

„Ton“: meist blaugrauer Schluff mit hohem Tonanteil, z.T. mit sandigen Linsen, z.T. gebändert (dann Bänderton), oft als Beckenton bezeichnet. Glaziale Entstehungszeit.

Torf: Zusammenfassung unterschiedlicher Torftypen (z.B. Bruchwaldtorf, Seggentorf, etc.). meist braun bis schwarzbraun. Glühverlust hier >80% (AABY 1986 gibt >90% für ombrogene Torfe an)

Seekreide: Weißlich hellgrau bis gelblich hellgraues Sediment. Der für Seekreide relevante Karbonatgehalt wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich definiert. MERKT et al. 1971 fordern einen Kalkgehalt von $\geq 90\%$, MENKE 1989 nennt $>90\%$. Da sowohl am Nussbaumer als auch am Bodensee die nach optischen Gesichtspunkten typische Seekreiden einen Karbonatgehalt $>85\%$ haben, wird in der vorliegenden Arbeit dieser als Grenzwert benutzt (vgl. auch BLUM et al. 1998). Seekreide ist meist schluffig, seltener sandig ausgebildet.

Zur Entstehung von Seekreide (und z.T. auch von Kalkmudde) siehe KLEINER 1991, KELTS & HSÜ 1978, RÖSCH 1997, SCHÄFER 1973 (teilweise überholt) und SCHÖTTLE, & MÜLLER 1968.

Kalkmudde: Optisch oft ähnlich der Seekreide, meist aber dunklere Farbtöne bis hellbraun, auch Olivtöne. MERKT et al. 1971 und MENKE 1989 grenzen den Karbonatgehalt dieses

Sedimenttyps auf 20% bis 90% ein. In Anpassung an den oben vorgestellten Grenzwert für Seekreide in dieser Arbeit wird der obere Grenzwert für die Kalkmudde entsprechend angenommen: 20%-85% Karbonatgehalt. Kalkmudde ist ebenfalls meist schluffig, seltener sandig ausgebildet.

Mudde: In der hier vorliegenden Arbeit wird dieser Begriff bei der makroskopischen Ansprache für tonig-schluffige, olivfarbene, manchmal seifige Kalkmudden, die meist nicht in sich gegliedert sind, benutzt.

Merkt et al. (1971) fordern für Mudden einen Glühverlust $>70\%$, in der hier vorliegenden Arbeit wird der Ausdruck „Mudde“ nicht in der geochemischen Sedimentklassifikation benutzt. Statt dessen werden Sedimente mit einem Karbonatgehalt $<20\%$ und einem Glühverlust $<80\%$ als „organisches Sediment“ bezeichnet.

Die hier in der optischen Ansprache als Mudden bezeichneten Sedimente weisen einen Glühverlust von 16%-22% auf.

2.1.1 Nussbaumer See

Die Beschreibung der einzelnen Kerne fängt mit der Probenahmelokalität des Transektes, die am weitesten vom See entfernt ist an und endet mit der Lokalität, die am tiefsten im See liegt (Abbildung 2). Es schließt sich die Stratigraphie der Lokalität K1 an (entnommener Metallkasten). Wie aus den folgenden Kernbeschreibungen hervorgeht, unterscheiden sich die Stratigraphien der Kerne aus dem heute landfesten Bereich (L-Kerne) von den Probenahmelokalitäten, die noch heute von Wasser bedeckt sind (W-Kerne). Die gesamte Stratigraphie ist in Abbildung 5 zu sehen, die Feinstratigraphie des untersuchten „Zeitfensters“ ist zusammen mit den chemischen Parametern des jeweiligen Kerns in Kapitel 2.5.1 dargestellt. Dabei wurde in der Übersichtsdarstellung bei den Kernen NBS L10, L13 und L16 zunächst die mit dem Kammerbohrer erfasste Stratigraphie dargestellt. In den Abbildungen der Feinstratigraphie (zusammen mit den chemischen Parametern) wurden die Bohrungen dargestellt, die mit einem modifizierten System

nach MERKT & STREIF (1970) niedergebracht wurden, da am Material dieser Bohrungen die chemische Analyse erfolgte (Materialausbeute mit dem Kammerbohrer zu gering). Die mit dem System nach MERKT & STREIF (1970) geborgenen Bohrkerne sind gegenüber den mit dem Kammerbohrer abgeteufte Kernen stärker gestaucht und enthalten damit weniger Information zur Stratigraphie.

NBS L16

- I: 0,35 m: Boden und Torf, ab 0,1 m ausschließlich Torf, dunkelbraun, scharfe Grenze zur Kalkmudde
- II: 0,7 m: Kalkmudde, z.T. angedeutete Bänderung, hell- bis mittelbraun; ab 0.64 m dunkler werdend
- III: 2,21 m: Torf, schwarzbraun, bei 1,38 m Holzkohlen
- IV: 3,0 m: Seekreide gelblich-weiß, 2,21-2,29 m Übergangsbereich: Kalkmudde mittelbraun scharfe Grenze zur Seekreide

NBS L2

- I: 0,06 m: Boden, schwarzbraun, zum Liegenden hin dunkelbraun
- II: 0,45 m: Seekreide (0,06-0,21 m) und Kalkmudde (0,21-0,45 m) mit Mollusken; Seekreide gelblich-weiß, undeutlich zweigeteilt; Kalkmudde hell- bis mittelbraun, undeutliche Bänderung, 0,41-0,45 m Verzahnung mit dem Liegenden, Grenze hier und auch zwischen Seekreide und Kalkmudde scharf
- III: 1,91 m: Torf mit Holzstücken, dunkel- bis schwarzbraun, 1,32-1,4 m Holz
- IV: 3,15 m: Seekreide mit Pflanzenresten, fahlgelb, 2,10-2,30 m hellgrau, 1,91-1,99 m Übergangsbereich: Kalkmudde gräuliches mittelbraun, Grenzen deutlich
- V: 4,14 m: Ton (bis 3,68 m ohne Sand) und Sand, blaugrau, zum Liegenden olivgrau; 3,15-3,20 m Übergangsbereich: Ton und Seekreide hellgelb-grau; ab 4 m gestörte Bänderung

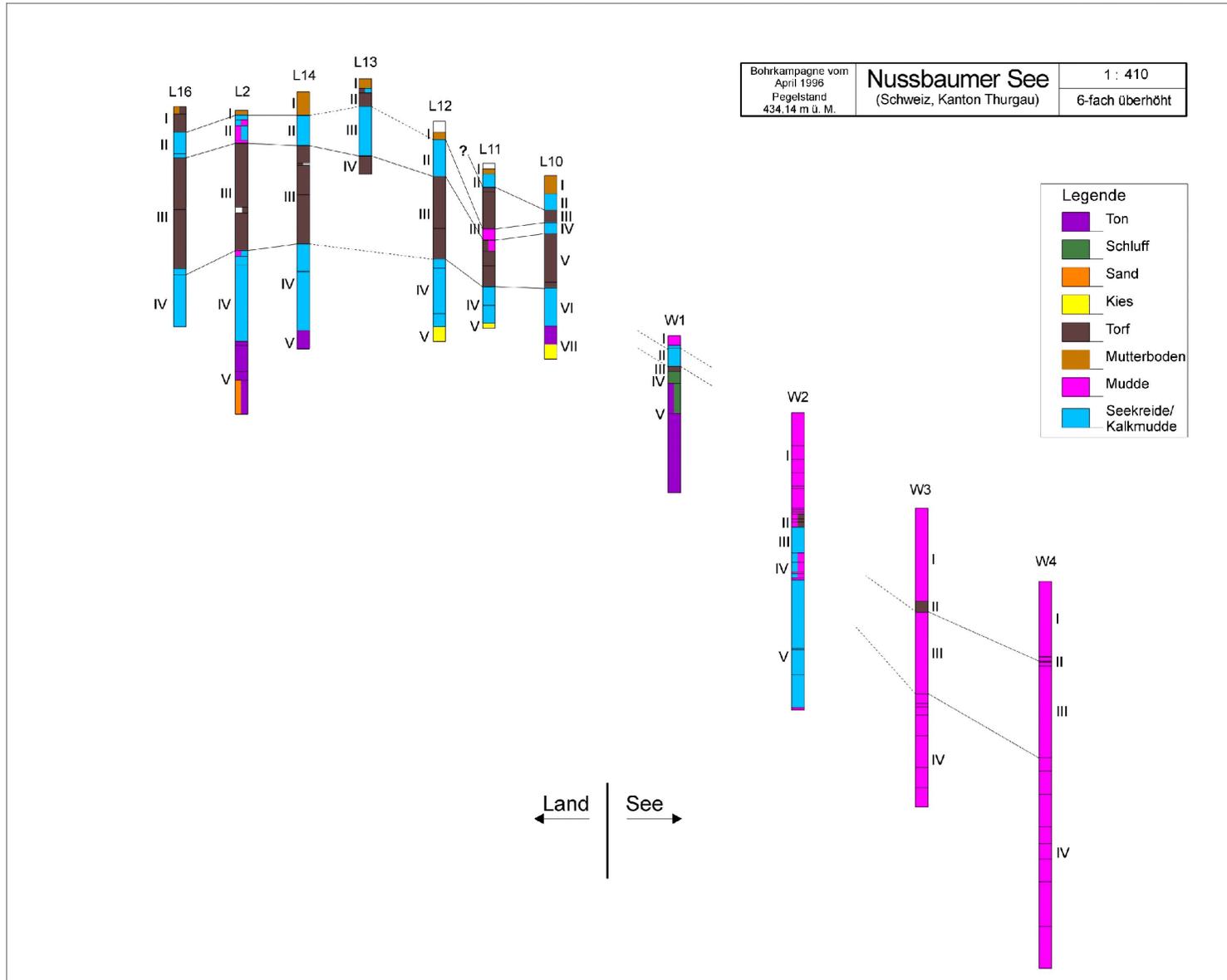


Abbildung 5: Vereinfachte Stratigraphie der Bohrkerne aus dem Nussbaumer See. Die römischen Ziffern geben die im Text beschriebenen LE an.

NBS L14

- I: 0,32 m: Boden und Torf, schwarzbraun
- II: 0,73 m: Seekreide, weiß bis hellgrau, ab 0,54 m hellgrau bis hellbraun (Kalkmudde?); bei 0,63 m mittelbraunes 1 cm-Band; Grenzen zu Liegenden und Hangenden deutlich, aber sichtbarer Übergangsbereich
- III: 2,07 m: Torf, schwarzbraun, 1-1,4 m mittel-dunkelbraun
- IV: 3,25 m: Seekreide, bei 2,45 m dunkles, 1 cm mächtiges Band
- V: 3,50 m: Ton

NBS L13

- I: 0,13 m: Boden, dunkelbraun
- II: 0,38 m: Torf, schwarzbraun; 0,13-0,19 m weißlich kalkige Einstreuung (Kalkmudde?)
- III: 1,05 m: Seekreide, hellgrau bis hellbraun, undeutliche Bänderung, 0,78-0,93 etwas dunkler
- IV: 1,3 m: Torf, schwarzbraun, Holz. Im Liegenden Kies der Moräne vermutet, da kein Bohrvortrieb mehr möglich war (freundl. Mitteilung Dr. J.N. Haas)

NBS L12

- I: 0,25 m: Kernverlust (0,15 m) und Boden, schwarzbraun
- II: 0,75 m: Seekreide, hellgrau bis hellbraun, undeutliche Bänderung; 0,25-0,55 m stark zersetzt; 0,55-0,75 m etwas heller, undeutliche Bänderung
- III: 1,88 m: Torf, schwarzbraun; 1,46-1,88 mittel- bis dunkelbraun und sehr fein, seifig ausgebildet (Wassereinfluß?)
- IV: 2,8 m: Seekreide, hellgrau; 1,88-2,0 m Gemisch aus Torf + Seekreide, dunkelbraun/mittelgrau; 2,62-2,80 m tonig
- V: Kiese und Sande der Moräne (im Kern nicht erfasst)

NBS L11

- I: 0,15 m: Kernverlust (0,08 m) und Boden, dunkelbraun
- II: 0,33 m: Kalkmudde, mittelbraun, undeutliche Bänderung; 0,15-0,2 m etwas dunkler (Übergangsbereich); Grenze zum Hangenden fließend, zum Liegenden scharf
- III: 1,68 m: Torf, schwarzbraun; 0,33-0,39 m mittel- bis dunkelbraun; 0,89-1,2 m mittelbraun, seifig, kalkhaltig, Mollusken (stark organische Kalkmudde?); 1,4-1,68 m Mollusken
- IV: 2,18 m: Seekreide, gelblich-weiß; bei 1,93 m schwarze Flecken
- V: Kiese und Sande der Moräne (im Kern nicht erfasst)

NBS L10

- I: 0,15 m: Kernverlust (Humusauflage)
- II: 0,47 m: Kalkmudde, fahlbraun bis mittelbraun, undeutliche Bänderung, 0,15-0,35 m etwas dunkler
- III: 0,64 m: Torf, dunkelbraun, zersetzt, sehr fein (Anmoor?); 0,47-0,54 m etwas heller; Grenze zum Hangenden scharf, zum Liegenden fließend
- IV: 0,79 m: Seekreide, fahlbraun, undeutlich gebändert, Grenze zum Liegenden deutlich
- V: 1,53 m: Torf, schwarzbraun; 1,45-1,53 m sandig, schluffig mit Holz
- VI: 2,05 m: Seekreide hellgrau-weiß, Bänderung
- VII: 2,30 m: Ton, darunter Kiese und Sande der Moräne (im Kern nicht erfasst)

NBS W1

- I: 0,13 m: Mudde, mittelbraun, Mollusken
- II: 0,42 m: Kalkmudde, gelblich-hellbraun; 0,13-0,17 m Holzkohleanreicherung
- III: 0,49 m: Torf, dunkelbraun, fein (Wassereinfluss?)
- IV: 0,65 m: Schluff, hell-olivgrau; erosive Grenze zum Hangenden, fließende zum Liegenden
- V: 2,14 m: Ton, mittelgrau/olivgrau; 0,65-1,06 mit Schluff

NBS W2

- I: 1,38 m: Mudde, oliv; 0-0,64 m helloliv, im Hangenden schluffig tonig; 0,64-1,0 m olivbraun, im Liegenden dunkler; 1,0-1,38 m helloliv, bei 1,0 m Mollusken
- II: 1,56 m: torfige Mudde, dunkelbraun, grob, Mollusken (Flachwassersediment?)
- III: 1,91 m: Seekreide, gelblich-weiß und hellgrau-weiß, 2-10 cm Bänderung mit interner undeutlicher Feinbänderung, Mollusken
- IV: 2,28 m: Kalkmudde, helloliv, einzelne fahlbraune Bänder 1-4 cm, interne undeutliche Feinbänderung, Mollusken
- V: 4,05 m: Seekreide, fahlgelb-oliv, fein gebändert, Mollusken; einzelne Bereiche mit mehr organischem oder mehr tonigem Anteil; 4,02-4,05 m organisch, graubraun

NBS W3

- I: 1,27 m: Mudde, mitteloliv, zum Liegenden geringfügig dunkler werdend
- II: 1,42 m: Mudde, torfig, dunkelbraun, fein, zum Liegenden heller werdend
- III: 1,53 m: Mudde, mitteloliv, einzelne Bereiche geringfügig dunkler
- IV: 4,07 m: Mudde, mittel- bis dunkeloliv wechselnd mit Mudde, torfig, olivbraun bis schwarzbraun; 2,82-3,10 m Mollusken, Holz; 3,53 & 3,81 m Mollusken

NBS W4

- I: 1,02 m: Mudde, mitteloliv, zum Liegenden geringfügig dunkler werdend
- II: 1,15 m: Mudde, mitteloliv und dunkelbraun bis schwarzbraun wechselnd, Mächtigkeit je 1-5 cm
- III: 2,40 m: Mudde, mitteloliv, einzelne Bereiche geringfügig dunkler
- IV: 5,27 m: Mudde, mittel- bis dunkeloliv wechselnd mit Mudde, torfig, olivbraun bis schwarzbraun; 2,58-2,90 m & 3,34-3,57 m & 4,09-4,70 m Mollusken; 4,70-5,27 m tonig

NBS K1 (ausgegrabener Metallkasten)

- I: 0,72 m: Seekreide, gelblich-braun; 0-0,13 m durchwurzelt; 0,32-0,5 m Bänderung; 0,5-0,53 m Kalkmudde, graubraun; 0,65-0,67 m Kalkmudde, mittelbraun; 0,69-0,72 m Übergangsbereich mit scharfer Grenze zum Liegenden
- II: 0,76 m: Torf, dunkelbraun, sehr fest („gepresst“); Störung der Schicht in einem Teil des Kastens
- III: 0,78 m: Seekreide, gelblich-braun; zum Hangenden und zum Liegenden scharfe Grenze; Störung der Schicht in einem Teil des Kastens
- IV: 0,93 m: Torf, schwarzbraun, Holzstücke

Im Folgenden wird das „Zeitfenster“ in den einzelnen Kernen beschrieben. Die Eingrenzung erfolgt aufgrund von ¹⁴C-Daten, pollenanalytischer Ergebnisse (alle Angaben zur Pollenanalyse in diesem Abschnitt freundl. mündl. Mitteilung M. Wehrli) und durch den Vergleich mit archäologisch bzw. dendrochronologisch datierten Stratigraphien.

Das stratigraphisch tiefere Ende des Zeitfensters beginnt am Nussbaumer See mit dem Torf (LE III in den L-Kernen mit Ausnahme von L13: LE IV und L10: LE V, Abbildung 5), dessen hangender Bereich radiometrisch zwischen 3380-3110 BP cal (L10) und 3220-2980 BP cal (L2) datiert wurde. Da dieser Torf jedoch als Baugrund der spätestbronzezeitlichen Siedlung diente, die zwischen 2820 und 2750 BP cal datiert ist (GOLLNISCH-MOOS 1999), entspricht letztere Datierung wohl dem Ende des Torfwachstums (Hiatus zur Seekreide im Hangenden des Torfes). Das stratigraphisch höhere Ende des Zeitfensters wird am Nussbaumer See durch die LE II (Seekreide) in L10 erfasst, welche radiometrisch auf 1340-1170 BP cal datiert wurde. Damit ist

das Zeitfenster für die L-Kerne eingegrenzt. Der vorangehenden stratigraphischen Gliederung ist nichts hinzuzufügen.

Für die W-Kerne ergibt sich folgendes Bild: In Kern W1 kann wegen der häufigen Hiaten (Ergebnis der palynologischen Untersuchungen) keine Eingrenzung erfolgen. In Kern W2 konnte der Abschnitt zwischen 1,70 m und 1,08 m pollenanalytisch auf den Zeitraum zwischen 7050 BP cal und 1150 BP cal datiert werden; auch hier erlauben Hiaten keine weitere Einengung des Zeitfensters. Die pollenanalytisch fassbaren Zeitmarken 1150 BP cal und 5750 BP cal befinden sich in Kern W3 bei 1,30 m bzw. 3,30 m Tiefe und in Kern W4 bei 1,25 m bzw. 3,60 m Tiefe. Die beiden Pollendiagramme sind gut korrelierbar; das von W3 weist einen Hiatus (wahrscheinlich 4000 und 700 BP cal, s. Kapitel 2.2.1.2) auf. Betrachtet man den selben Zeitabschnitt in den beiden Kernen, dann ist seine Mächtigkeit in NBS W3 geringer. Die Differenz kann durch den o. g. Hiatus erklärt werden.

Im Folgenden wird die Untergliederung des Zeitfensters im Kern W4 vorgenommen (W1-W3 bleiben wg. der Hiaten unbeachtet).

Die Schichten im Zeitfenster von Kern W4 sind sich sehr ähnlich, Schichtgrenzen sind meist fließend. Die Eingrenzung des Fensters erfolgte durch die palynologische Zeiteinstufung (Probenabstand hier 20 cm, d.h. innerhalb dieses Bereichs befindet sich das angegebene Alter). Die Beschreibung erfolgt vom Liegenden zum Hangenden: die unterste Schicht ist eine stark organische („torfige“), dunkel- bis schwarzbraune Mudde, molluskenhaltig. Die zum Hangenden hin folgende Schicht ist heller, feiner, olivfarben und enthält ebenfalls Molluskenbruchstücke. Anschließend folgt eine 3-4 cm mächtige, hellolivfarbene Kalkmudde (vergl. Abbildung 27). An diese grenzt im Hangenden wieder eine dunklere, olivfarbene Mudde. Es folgt ein mehrfacher Wechsel der hellen und dunklen Muddeschichten. Die weiter zum Hangenden folgenden Schichten lassen sich nicht näher differenzieren.

2.1.2 Bodensee-Gnadensee

Ähnlich wie am Nussbaumer See läßt sich im Gnadensee der ufernahe (Gn1) vom haldennahen Bereich (Gn2-6) unterscheiden. Außerdem unterscheiden sich die Sedimente des östlichen Endes des Gnadensees (Gn7) vom westlichen (Markelfinger Winkel, Gn1-6).

Das hier mit Schluff bezeichnete Sediment enthält meist einen nicht näher bestimmten Tonanteil, die Genauigkeit der Tiefenangaben dürfte aufgrund des Bohrvorganges etwa ± 5 cm betragen, es wurde auf- bzw. abgerundet.

Eine Übersicht über die Stratigraphie gibt Abbildung 6.

Gn1

I: 2 m: Sand, dunkelgrün-grau

Gn2 (Flachwasserbereich, mit geringer Neigung zum See hin einfallenden)

I: 0,1 m: Mittel- und Feinsand, oliv, zum Liegenden hin dunkelgrau werdend (rezente Auflage)

II: 7,3 m: Bänderung gebildet durch sandigen Schluff (grau bis olivgrau) und schluffigen Sand (hellgrau bis fahlgelb)

III: 11,2 m: toniger Schluff, Bänderung durch Farbwechsel von hellgrau/gelb zu hellolivgrau/oliv

Gn3 (Beginn der Halde)

I: 2,1 m: sandige, dunkelgrüngraue Bereiche alternieren mit fahlgelben, stark schluffigen Sandbereichen; bei 0,35 m befindet sich ein 0,1 m mächtiges, hellgraues, sandiges Schluffband

II: 2,7 m: Sand und Schluff, grau bis hellolivgrau

III 7,4 m: Schluff, Bänderung durch Wechsel gröberer und feineren Materials einhergehend mit Farbwechsel von olivgrau zu fahloliv; in den gröberer Bändern auch geringer Feinsandanteil

IV 8,3 m: toniger Schluff, olivgrau, zum Liegenden mit steigendem Tonanteil grüngrau werdend

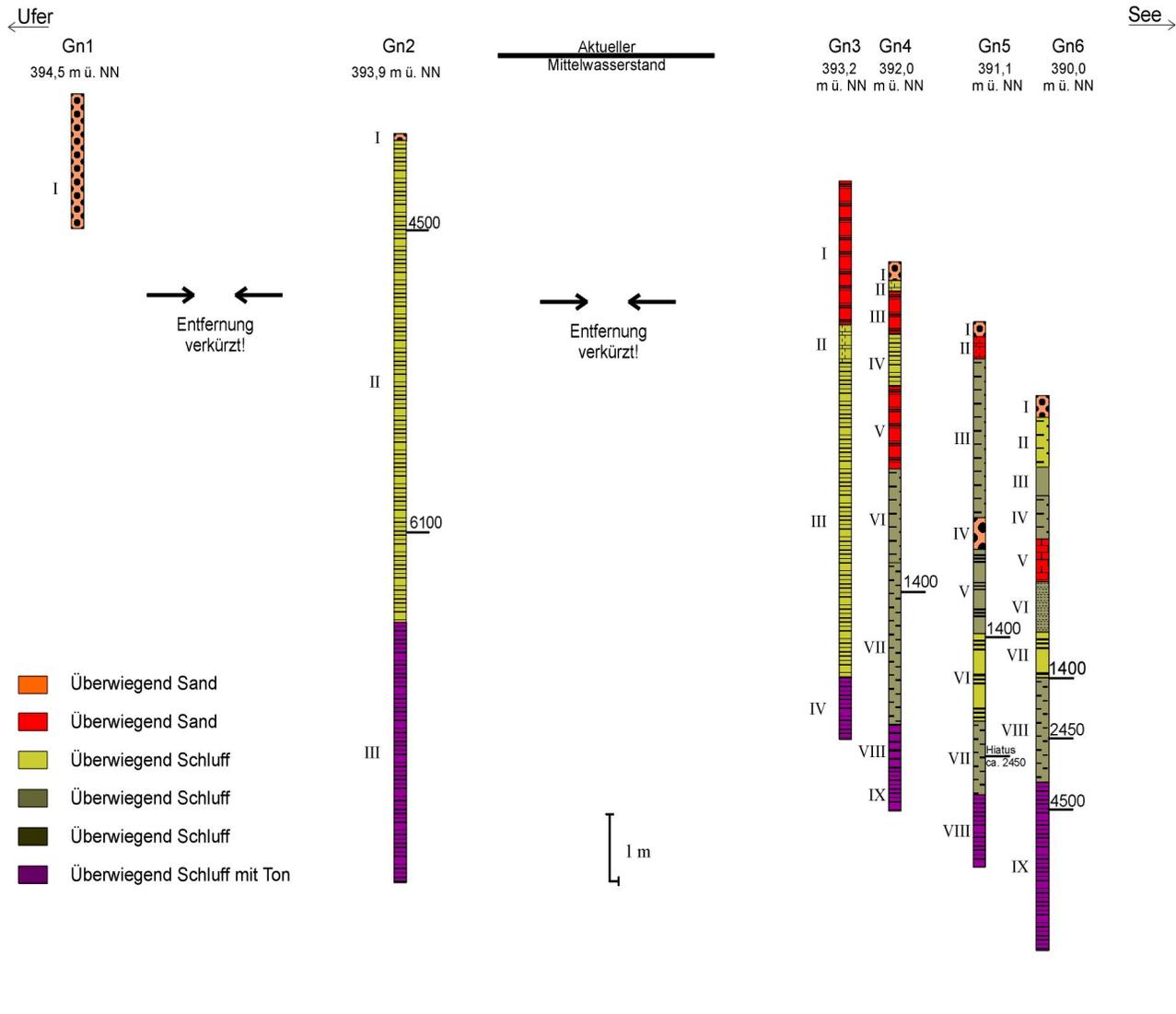


Abbildung 6: Vereinfachte Stratigraphie der Bohrkerne aus dem Bodensee-Gnadensee. Die röm. Ziffern bezeichnen die im Text beschriebenen LE; die arabischen Ziffern geben das mittels der Pollenanalyse abgeschätzte Alter in [a BP cal] an. Unterschiedliche Farben und Signaturen für die selbe Korngröße unterscheiden deren unterschiedliche Ausbildung (Farbe, Lamination etc.).

Gn4 (Halde)

- I: bis 0,2 m: Mittelsand, grüngrau (rezente Auflage)
- II: bis 0,4 m: Sand und Schluff, hellgrau
- III: 1,1 m: Bänderung durch Wechsel von Sand (dunkelgrüngrau) und Schluff (hellgrau)
- IV: 1,8 m: Schluff und Sand, fahlgelb bis hellolivgrau, undeutliche Bänderung durch Wechsel von grob zu fein
- V: 3,1 m: fahlgelber, sandiger Schluff alternierend mit dunkelgrüngrauem Sand
- VI: 4,5 m: gering sandiger Schluff, hellolivgrau, angedeutete Bänderung
- VII: 6,9 m: Schluff, fahloliv bis oliv, z.T. Bänderung durch Wechsel von grob zu fein, hier dann auch gering sandig
- VIII: 7,6 m: Schluff, sehr gering sandig, sehr gering tonig, olivgrau, gebändert
- IX: 8,2 m: Schluff und Ton, olivgrau, z.T. auch dunkelgrüngrau, undeutliche Bänderung

Gn5 (Halde)

- I: 0,2 m: Sand, grauschwarz (rezente Auflage)
- II: 0,6 m: Sand und Schluff, grüngrau
- III: 2,9 m: gering sandiger Schluff, hellgrau, zum Liegenden mit abnehmendem Sandanteil olivgrau werdend, z.T. undeutliche Bänderung
- IV: 3,4 m: Sand, (dunkel)grau, undeutliche Bänderung
- V: 4,7 m: Schluff, z.T. gering feinsandig, Wechsel von 5-15 cm mächtigen Bändern, hellgrau und olivgrau, mit undeutlicher interner Feinschichtung (bis 2 mm)
- VI: 6,0 m: 5-15 cm mächtige Bänder aus sandigem Schluff (hellgrau bis fahlgelb) wechseln mit ebenso mächtigen oliv bis olivgrauen Schluffbändern; beide Bändertypen weisen teilweise interne Feinschichtung auf
- VII: 7,1 m: Schluff, teilweise mit sehr gering sandigen Bereichen, fahloliv bis olivgrau, undeutliche Bänderung
- VIII: 8,1 m: toniger Schluff, hellolivgrau bis oliv, z.T. undeutliche Bänderung

Gn6 (Halde)

- I: 0,3 m: gering schluffiger Sand, dunkelgrau bis fahloliv, angedeutete Bänderung
- II: 1,1 m: Schluff, z.T. auch schluffiger Sand, hellgrau bis olivgrau
- III: 1,5 m: Schluff, olivgrau
- IV: 2,1 m: Schluff, z.T. feinsandig, fahloliv bis oliv
- V: 2,8 m: Sand, hellgrau, undeutliche Bänderung durch den Wechsel von grob zu fein, hier auch gering schluffig
- VI: 3,5 m: Schluff, hellgrau bis fahloliv, undeutliche Bänderung
- VII: 4,2 m: Schluff, im Hangenden dieser LE gering sandig, Wechsel von hellgrauen und olivfarbenen Bereichen, z.T. mit interner Feinschichtung durch den Wechsel von grob (hell) zu fein (dunkel)
- VIII 5,8 m: Schluff, z.T. sehr gering sandig, oliv bis olivgrau, Bänderung, z.T. undeutlich
- IX: 8,3 m toniger Schluff, oliv bis olivgrau, Bänderung, z.T. undeutlich

Gn7

Der Bohrkern Gn7 aus dem östlichen Ende des Gnadensees weist durchgehend eine unterschiedlich gut ausgeprägte Feinschichtung auf (Abbildungen 7 und 33).

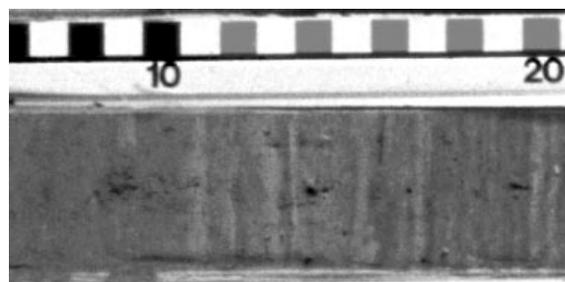


Abbildung 7: Typische Feinschichtung in Kern Gn7. Maßstab in [cm].

- 0,04 m: Oxidationshorizont, gelbbraun (1 cm) und Reduktionshorizont, dunkelgrau (3 cm), beide Lagen Schluff, tonig
- I: 0,6 m: Schluff, selten gering tonig und/ oder feinsandig, grünliches gelbbraun
- II: 4,3 m: Schluff, Wechsellagerung wechselnder Mächtigkeit von hellgrauen und olivgrauen bis olivbraunen Lagen
- III: 6,4 m: Schluff, gering feinsandig, olivbraune bis olivgelbe Schichtung mit einzelnen grauen Lagen
- IV: 8,9 m: Schluff, z.T. tonig, olivgrau mit angedeuteter Feinschichtung, Bankung zwischen 5 - 20 cm Mächtigkeit
- V: 10,4 m: Schluff, z.T. tonig, fahlliv, undeutliche Schichtung, zwischen 9,61 und 9,94 m Einschaltung mehrerer grauer Schichten mit bis zu 5 cm Mächtigkeit

Im Folgenden wird das untersuchte Zeitfenster (hier ca. 2100-1000BP cal, pollenanalytisch eingegrenzt, s.a. Kapitel 2.2.2.2) genauer betrachtet. Es muß darauf hingewiesen werden, dass die Eingrenzung aufgrund der großen Abstände (20-85 cm) zwischen den untersuchten Pollenproben ungenau ist. D.h. die im Vergleich zu Probe X in Probe Y auftretende Häufung bestimmter Pollen lässt sich darauf zurückführen, dass die Grenze der beiden Zeitabschnitte (welche die angenommenen Proben hier vertreten sollen) im unbeprobten Bereich zwischen den beiden Pollenproben liegt.

Bei dem Sand in Bohrkern Gn1 dürfte es sich um umgelagertes Material der Oberen Süßwassermolasse handeln; eine Datierung ist nicht möglich.

Die Sedimente in Gn2 wurden vor Beginn des Zeitfensters d.h. vor 3150 BP cal abgelagert.

In Gn3 ist das Zeitfenster nicht näher bestimmt, in den Kernen Gn4-6 weist es jeweils ähnliche Mächtigkeiten auf. Im Folgenden werden diese Sedimentbereiche genauer beschrieben. Die Feinstratigraphie der Zeitfenster von Gn4-7 ist in den Abbildung 29 und 31-33 (Kapitel 2.5.2) widergegeben.

In Gn4 liegt das Zeitfenster zwischen 4,8 m unter GOK und 6,3 m unter GOK (1300-1700 BP cal): d.h. es liegt in LE VII. Betrachtet man diesen Bereich genauer, so erkennt man einen Wechsel von 1-8 cm starken, helleren und dunkleren Bändern (s.a. Abbildung 29). Dieser Farbwechsel geht einher mit der Zu- und Abnahme des Ton- bzw. Sandanteils im Schluff. Einzelne Bänder weisen eine interne, z.T. undeutliche Feinschichtung auf.

In Gn5 befinden sich laut Pollenanalyse zwischen 4,9 m und 6,4 m unter GOK die Sedimente aus dem Zeitraum zwischen 1300-1800 BP cal (s.a. Abbildung 31). Dies entspricht dem Bereich der LE VI und im Hangenden Bereich der LE VII. Die Bänderung durch Farbunterschiede in LE VI ist sehr deutlich ausgebildet: die Grenzen der hellen (fahlgelb bis hellgrauen) Schichten sind im Liegenden meist sehr scharf ausgebildet, während man im Hangenden einen allmählichen Übergang in den folgenden dunkleren (oliv) Bereich feststellt. Die schluffigen Bereiche sind sich meist seifig, ein erster Hinweis auf einen hohen Anteil an Algen im Sediment.

Das Zeitfenster in Gn6 befindet sich zwischen 3,4 und 4,9 m unter GOK (1000-1800 BP cal). Es umfasst damit den untersten Bereich der LE VI, die LE VII und die hangenden Bereiche der LE VIII. Auch hier erscheinen die schluffigen Bereiche meist seifig (s.a. Abbildung 32).

Der in Gn7 untersuchte Bereich liegt zwischen 4,25 und 5,80 m Tiefe (1400-2080 BP cal); damit also im Bereich der hell- und olivgrauen Wechsellagerung des liegenden Endes von LE II und einen Teil von LE III. Die Stärke der einzelnen Lagen schwankt hier zwischen 1 und 3 mm, auffallend sind einzelne graue Bänder in unregelmäßigen Abständen.

2.1.3 Diskussion und Zusammenfassung

Am Nussbaumer See liegen zeitgleich abgelagerte Sedimente in zwei Faziestypen vor: Die der (ehemaligen) Flachwasserzone, die zeitweise trockengefallen ist (L-Kerne) und die der Zone aus tieferem Wasser, die nie trocken lagen. Die zwei Zonen werden durch den „oberen“ Teil der Halde getrennt; hier weist die Stratigraphie Hiaten auf, die eine direkte Schichtkorrelation zwischen L-Kernen und W-Kernen unmöglich macht.

Die Sedimente im Markelfinger Winkel (Gnadensee) wechseln häufig, eine optische Schichtkorrelation zwischen den einzelnen Kernen ist hier ebenfalls nicht möglich.

Für den Markelfinger Winkel (Gn3-Gn6) zeigt sich unter Verwendung der pollenanalytischen Daten folgender Ablagerungsprozess: Die einzelnen zeitgleich abgelagerten Schichten legen sich zwiebelschalenartig über den Untergrund, wobei keine Schicht durchgängig vom Ufer bis zur heutigen Halde reicht. Ab einer gewissen Sedimenthöhe, d.h. einer geringen Wassertiefe, gelangt kein Sediment mehr zur Ablagerung. Nach möglicherweise höherem Wasserstand wird sedimentiertes Material wieder erodiert. Jüngeres Material setzt sich nun nur seewärts und nicht mehr am Top des vorhandenen Materials ab. Die in Gn1 und Gn2-6 unterschiedenen Faziesbereiche wurden also nicht zeitgleich abgelagert. Die Sedimente in Gn7 entstammen im Allgemeinen einer anderen Fazies als die Sedimente aus dem Markelfinger Winkel, sind aber mit denen aus Gn3-Gn6 z.T. zeitgleich. Die Faziesunterschiede können nicht auf die Wassertiefe zurückgeführt werden, sondern auf die geografische Lage im Gnadensee.

Das beschriebene Sedimentationsmodell entspricht dem von RÖSCH 1997 anhand von Pollenanalysen für den Bereich von Horn (Hornspitze, Bodensee-Untersee) aufgestellten Modell. Somit scheint das Sedimentationsmodell nicht nur für den Markelfinger Winkel, sondern für den ganzen Untersee zu gelten.

2.2 Magnetische Suszeptibilität, Datierungen und Sedimentakkumulationsraten

Den Ergebnissen sollen einige erklärende Bemerkungen vorangestellt werden:

Magnetische Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität (dimensionslos) ist indirekt ein Maß für die Menge an magnetisierbaren Mineralen (OSTENDORP & BLUM 1998). Diese können sich entweder autochthon im Seesediment bilden oder, häufiger, von außen eingetragen werden (LOIZEAU et al. 1997). Seekreide liefert ein Signal nahe Null, das mit der Reinheit abnimmt (THOMPSON & KELTS 1974); reiner Calcit hat als diamagnetisches Material eine Suszeptibilität von $-13,8 \cdot 10^{-6}$ SI (DE WALL 1998). Signale sind somit von allochthonen Komponenten zu erwarten; eine ansteigende magnetische Suszeptibilität kann man als einen Indikator für zunehmenden allochthonen Eintrag in den See betrachten (Bsp. Muskovit $36-711 \cdot 10^{-6}$ SI, Goethit $2150-6450 \cdot 10^{-6}$ SI, DE WALL 1998).

Datierungen

Da generell die Datierung der einzelnen Kerne unerlässlich für die Interpretation aller weiteren Daten ist, werden hier alle vorhandenen ^{14}C -Datierungen und deren Kalibration (notwendige Korrektur der Daten wegen Schwankungen des ^{14}C -Gehaltes der Atmosphäre im Laufe der Zeit) zusammengestellt (Tabelle 1). Anschließend wird ihre Plausibilität im Vergleich zur Serie der ^{14}C -Datierungen und zu den Ergebnissen der Pollenanalyse diskutiert.

Die radiometrischen Datierungen können durch den Hartwassereffekt oder durch Umlagerung zu hohe Alter vortäuschen (WAGNER 1995). Der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert ist ein Maß für die Isotopenfraktionierung in unterschiedlichen Reservoiren; als Standard wird der ^{14}C -Gehalt einer Probe auf -25‰ ($\delta^{13}\text{C}$ von Holz) bezogen (WAGNER 1995). Um ein korrektes Alter zu erhalten, muß der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert nahe -25‰ liegen, gleichzeitig bestätigt ein solcher $\delta^{13}\text{C}$ -Wert die terrestrische Herkunft des Probenmaterials. Der Hartwassereffekt wird dadurch weitgehend ausgeschlossen. In der vorliegenden Arbeit sind für alle Messungen diese Voraussetzungen gegeben.

Probleme mit den anhand der Palynologie bestimmten Altersangaben können durch lokale Variationen der Pollenzusammensetzung, große Probenabstände, ungünstiges Auflösungsvermögen oder/und falsche ^{14}C -Datierungen des Standarddiagramms hervorgerufen werden. Daher sind meist zusätzliche ^{14}C -Datierungen notwendig.

Sedimentakkumulationsraten

Sich verändernde Sedimentakkumulationsraten sind erste Indizien für sich während der Ablagerung verändernde Umweltbedingungen. In diesem Abschnitt soll zunächst eine Übersicht gegeben und dann die Interpretationsmöglichkeiten der Akkumulationsraten diskutiert werden.

2.2.1 Nussbaumer See

2.2.1.1 Suszeptibilität

Die Suszeptibilität der untersuchten Sedimente liegt, mit Ausnahme der glazialen Tone, für die meisten Kernbereiche im Untergrund des Messverfahrens. Zudem lassen die vorhandenen Signale der Kerne W2-W4 aufgrund des Probenahmeverfahrens keine Auswertung zu: Die Bohrkern wurden nach der Methode von MERKT & STREIF (1970) ohne Plexiglashülse genommen. Das Material wird dabei aus den Metallhülsen auf eine Kunststoffhalbschale gepresst. Durch die unterschiedliche Konsistenz verschiedener Schichten kommt es bei diesem Arbeitsschritt zu Variationen der Dicke (und damit zu unterschiedlichem Volumen) und zu ungleichmäßigen Anfangs- und Endbereichen der Sedimentsäule. Da die Volumensuszeptibilität χ gemessen wurde, können die hier vorhandenen Signaländerungen durch eine Volumenänderung bewirkt worden sein.

2.2.1.2 Datierungen

Bei dem datierten Material handelt es sich um terrestrische Makroreste oder um Holzkohle. Aus Kern NBS L2 wurde dieses datierbare Material von Dr. J.N. Haas, das aus NBS W3, W4 und den Gnadensee-Kernen von M. Wehrli jeweils entnommen und bestimmt. Die Proben aus NBS L10 wurden vom Autor entnommen und von Dr. U. Maier bestimmt.

Die Kalibration der ^{14}C -Daten in Tabelle 1 erfolgte mit dem Programm OxCal3.3 (RAMSEY 1999) mit der Kalibrationskurve nach STUIVER et al. 1998. Bei der Probenbezeichnung (Tabelle 1) gibt

die Zahlenangaben nach Orts- und Kernbezeichnung die Tiefe der entnommenen Probe an, in Klammern ggf. die unkorrigierten Originalangaben. Die Labornummern wurden von den jeweiligen Labors vergeben: UtC: Universiteit Utrecht, R.J. Van de Graaf laboratorium, Dr. K. van der Borg; Ua: Uppsala University, Ångström Laboratory, Dr. G. Possnert & Dr. M. Södermann.

Zunächst werden die Datierungsreihen der einzelnen Kerne betrachtet (die Datierungen sind vom Hangenden zum Liegenden sortiert, d.h. von stratigraphisch jung nach alt):

In Kern NBS L2 sind die stratigraphisch jüngeren Proben auch radiometrisch jünger datiert. Ausnahme ist nur die Probe NBS L2 60-62, sie ist im Vergleich zu den stratigraphisch jüngeren Proben zu jung. Dies kann als Kontamination gedeutet werden: Die Datierung erfolgte an einem Stückchen Erlenwurzholz; diese Wurzel könnte auch zu einem Zeitpunkt nach der Sedimentation der zu datierenden Schicht in die Schicht hineingewachsen sein (freundl. Mitteilung Dr. J.N. Haas). Diese Erklärung wird durch stratigraphisch höher liegende Erlenwurzeln, die schräg nach unten wachsen, unterstützt. Die palynologische Alterseinstufung passt, bis auf den eben besprochenen Ausreißer, gut zu den ^{14}C -Datierungen (freundl. Mitteilung Dr. J.N. Haas).

Die Schichten von Kern NBS L10 werden durch die drei ^{14}C -Daten in guter Übereinstimmung mit der Stratigraphie datiert.

Die ^{14}C -Datierung von NBS W3 184 stimmt mit den pollenanalytischen Ergebnissen gut überein (freundl. Mitteilung M. Wehrli und Dr. M. Rösch, denen an diese Stelle für ihre Mühe herzlich gedankt sei).

In Kern W4 wurden die Proben zunächst falsch beschriftet (Originalangaben in Klammern in Tabelle 1). Dieser Fehler konnte durch Berücksichtigung der Stratigraphie und der pollenanalytischen Ergebnisse korrigiert werden. Dazu wurden jeweils die einzelnen Tiefenangaben gemäß ihrer Lage in den Kernsektionen umgerechnet (Kernsektion B 100-199 cm, Kernsektion C 199-309 cm) und als neue Beschriftung übernommen.

Die Datierung NBS W4 174-175 (stratigraphisch jüngste Probe) ist mit 10800 BP spätglazialen Alters, sodass man von einer Kontamination ausgehen muß. Alle anderen ^{14}C -Daten lassen sich gut mit den pollenanalytischen Ergebnissen in Einklang bringen. Die RPZ „QC“ (Regionale Pollen Zone nach RÖSCH 1997, 3400-3900 BP cal) ist wegen der Auflösung im Pollendiagramm nicht zu erkennen, radiometrisch aber erfasst worden.

Probenbezeichnung	Labor-Nr.	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	^{14}C -Alter [a BP]	kalibriert 2 σ [a BP cal]	kalibriert 2 σ [a]
NBS L2 10-12 (43-45)	UtC-5792	-28	2238 \pm 34	2350-2150	400-200 BC
NBS L2 21-23 (54-56)	UtC-5793	-27,2	2495 \pm 46	2740-2360	790-410 BC
NBS L2 29-31 (62-64)	UtC-5794	-26,7	2449 \pm 35	2720-2350	770-400 BC
NBS L2 42-43 (75-76)	UtC-5795	-29,7	2933 \pm 34	3210-2960	1260-1010 BC
NBS L2 45-47 (78-80)	UtC-5796	-30,0	2990 \pm 36	3330-3030	1380-1080 BC
NBS L2 60-62 (93-95)	UtC-5797	-28,9	2032 \pm 37	2110-1890	170 BC-60 AD
NBS L10 49-52	UtC-9783	-28,9	1352 \pm 40	1340-1170	610-780 AD
NBS L10 61,5	UtC-8850	-29,0	1863 \pm 37	1880-1700	70-250 AD
NBS L10 77-78	UtC-8851	-29,2	3036 \pm 41	3360-3070	1410-1120 BC
NBS W4 174-175 (123-124)	UtC-7395	-26,3	9700 \pm 50	11230-10760	9280-8810 BC
NBS W4 242 (266)	Ua 16630	-29,6	3245 \pm 70	3640-3340	1690-1390 BC
NBS W4 264 (244)	UtC-7397	-26,8	3410 \pm 60	3830-3470	1880-1520 BC
NBS W4 300 (208)	UtC-7396	-27,7	3611 \pm 37	4080-3770	2130-1820 BC
NBS W4 303 (205)	Ua 16629	-28,2	3850 \pm 140	4650-3800	2700-1850 BC
NBS W3 184	UtC-7398	-26,9	4045 \pm 40	4810-4410	2860-2460 BC
Gn5 525,5	Ua 16631	-30,4	1285 \pm 70	1310-1010	640-940 AD
Gn6 258 (2b 14)	Ua 15107	-27,1	700 \pm 65	740-540	1210-1410 AD
Gn6 341-345 (3a 32-36)	Ua 16632	-25,6	1330 \pm 65	1350-1070	600-880 AD
Gn7 18 (1a 43)	Ua 15108	-29,2	121 \pm 1	270-20	1680-1930 AD
Gn7 430,5-434,5 (3b 24-28)	Ua 16632	-27,2	1280 \pm 70	1310-1010	640-940 AD
Gn7 461 (3b 56)	Ua 15109	-26,7	1470 \pm 80	1540-1250	410-700 AD

Tabelle 1: Zusammenstellung der ^{14}C -Datierung. NBS: Nussbaumer See, Gn: Bodensee-Gnadensee. Weitere Erläuterungen siehe Text.

2.2.1.3 Sedimentakkumulationsraten

Man muß hier von Sedimentakkumulation sprechen, da man die Sedimentmächtigkeit pro Zeiteinheit berechnet (die Sedimentationsrate müßte um die Sedimentdichte und Porosität korrigiert werden). Sinnvolle Sedimentakkumulationsraten lassen sich nur über lange Zeitbereiche mitteln oder für kurze Sedimentakkumulationszeiträume, für die sicher kein Hiatus vorliegt, berechnen. Insofern haben die in Tabelle 2 für NBS L10 angegebenen Raten nur Vergleichswert, da man wegen der Schichtwechsel in diesem Kern Hiatus annehmen muß (deshalb wurde hier nur die Akkumulationsrate zwischen ältester und jüngster Probe berechnet).

In Tabelle 2 wurde jeweils die Probentiefe, ihr mittleres, maximales und minimales ^{14}C -Alter (2 σ -Bereich) notiert. Nun wurden die zugehörigen Sedimentakkumulationsraten berechnet; maximale Akkumulationsraten ergeben sich aus dem maximalen Alter der jüngeren und dem minimalen Alter der älteren Probe. Entsprechendes gilt für die minimale Sedimentakkumulationsrate.

Die Daten von Kern NBS L2 aus 220 und 300 mm Tiefe liegen auf einem so genannten ^{14}C -Plateau, ihre mittleren Alter erscheinen invers. Eine genauere Kalibrierung ist nicht möglich, deshalb wurden die Daten bei der Berechnung der Sedimentakkumulationsraten nicht berücksichtigt. Für Kern NBS W4 wurden nur zwei Datierungen zur Berechnung ausgewählt, da die anderen beiden Datierungen im Rahmen der Kalibration mit den ausgewählten übereinstimmen.

Bei der Betrachtung der Daten fällt zunächst die große Spannweite zwischen minimal und maximal errechenbarer Akkumulationsrate, vor allem für Kern NBS W4, auf. Hier wird die Notwendigkeit einer genauen Datierung der Sedimente für Interpretationen im dekadalen und säkularen Zeitbereichen deutlich. Trotz der weiten Spanne der Akkumulationsraten ist klar, dass der Kern NBS W4 etwa die 10-fache Rate der L-Kerne aufweist.

	Tiefe [mm]	Alter BP cal			Sedimentakkumulationsrate (mm/Jahr)		
		Mittelwert	maximal	minimal	Mittelwert	maximal	minimal
NBS L2	110	2250	2350	2150	-----	-----	-----
NBS L2	220	2550	2740	2360	} 0,34	0,52	0,30
NBS L2	300	2535	2720	2350			
NBS L2	425	3085	3210	2960	-----	-----	-----
					} 0,37	nicht berechenbar	0,10
NBS L2	460	3180	3330	3030			
NBS L10	505	1255	1340	1170	-----	-----	-----
NBS L10	615	1790	1880	1700	} 0,14	0,16	0,12
NBS L10	775	3215	3360	3070	-----	-----	-----
NBS W4	2420	3490	3640	3340	} 1,3	4,5	0,8
NBS W4	3000	3925	4080	3770			

Tabelle 2: Anhand vorhandener ^{14}C -Datierungen berechnete Sedimentakkumulationsraten. Weitere Erläuterungen siehe Text

2.2.2 Bodensee-Gnadensee

2.2.2.1 Suszeptibilität

Alle Messungen der magnetischen Suszeptibilität zeigen ein schwaches Signal von unter $100 \cdot 10^{-6}$ Si. Kern Gn1 liefert als einziger Kern Signale, die über dem Untergrundrauschen liegen. Die anderen Bohrkerne weisen Suszeptibilitätswerte unter $20 \cdot 10^{-6}$ Si auf und liegen somit unter der Nachweisgrenze des Messgerätes.

Dabei stellt nur das Signal in Gn7 bei 24 cm Tiefe mit $40 \cdot 10^{-6}$ Si eine Ausnahme dar. Einer makroskopisch sichtbaren Besonderheit kann das Signal nicht zugeordnet werden.

2.2.2.2 Datierungen

Die Bohrkern G_n2, G_n4, G_n5, G_n6 und G_n7 wurden pollenanalytisch untersucht (M. Wehrli). Aufgrund der ¹⁴C-Datierungen und der Interpretation der Pollendiagramme (freundl. Mitteilung M. Wehrli und Dr. M. Rösch) konnten die in den Bohrkernen erfassten Sedimentationszeiträume eingegrenzt werden. Die sedimentologische Beprobung folgt der ersten rein pollenanalytischen Eingrenzung des Zeitfenster 3450-1450 BP cal, die sich aufgrund von ¹⁴C-Datierungen als eine zu alte Einschätzung der Sedimente herausstellte. Die sedimentologisch untersuchten Bereiche sind deshalb ca. 1000 Jahre jünger als gewünscht (Tabelle 3). Die aktuelle Alterseinteilung erfolgt anhand der regionalen Pollenzonen (RPZ, RÖSCH 1997), der Grad der Genauigkeit wird hier durch die Probenabstände (40-100 cm) bedingt. Weitere, kleinere Hiaten sind deshalb nicht auszuschließen. Das Alter des sedimentologisch untersuchten Bereichs wurde durch die einer RPZ-Grenze am nächsten kommende Beprobungsgrenze festgelegt und durch Anwendung der Sedimentakkumulationsrate bis zur zweiten Beprobungsgrenze berechnet. Anschließend wurde das berechnete Alter der zweiten Beprobungsgrenze mit dem Pollendiagramm abgeglichen. Die Angaben sind jeweils auf 5 cm und 10er Jahre gerundet. Die Sedimentakkumulationsrate (Tabelle 3) wurden jeweils aus dem (maximalen) Ablagerungszeitraum und der Sedimentmächtigkeit berechnet.

Der Hiatus in G_n6 ist nicht gesichert (Tabelle 3). Die RPZ „QC“ fehlt; dies könnte aber auch in den weiten Probenabständen seine Ursache haben. Bei der Berechnung der Sedimentakkumulationsrate in G_n6 wurde der Hiatus nicht mit einbezogen. Trotzdem stimmt die Altersbestimmung des sedimentologisch untersuchten Bereichs mit Hilfe der Sedimentakkumulationsrate in diesem Kernabschnitt nicht mit dem aus dem Pollendiagramm ermittelten Alter überein. Es wurde deshalb für den sedimentologisch untersuchten Bereich von Kern G_n6 das aus dem Pollendiagramm abgeschätzte Alter verwendet (Mitte RPZ „Q2“ bis Ende RPZ „QBFCa“, Sedimentakkumulationsrate hier 1,8 mm/a).

	Gn2	Gn4	Gn5	Gn6	Gn7
palynologisch begutachteter Bereich	1,95-7,00 m	2,20-6,40 m	0,40-7,70 m	1,60-6,60 m	0,05-6,80 m
Ablagerungszeitraum [a BP cal]	4000-6500	700-1700	0-3000	500-5000	0-3000
Hiaten [a BP cal]	-	-	1800-2500 (6,40 m)	3400-4000 (?) (5,80 m)	-
Sedimentakkumulationsrate	3,4 mm/a	4,2 mm/a	3,2 mm/a	1,1 mm/a	2,3 mm/a
sedimentologisch untersuchter Bereich	-	4,85-6,35 m	4,90-6,40 m	3,55-4,95 m	4,25-5,80 m
Alter dieses Bereiches [a BP cal]	-	1310-1690	1300-1800	1000-1800	1400-2080

Tabelle 3: Alterseinstufung, Sedimentakkumulationsraten und sedimentologisch bearbeiteter Bereich der Bohrkern aus dem Bodensee-Gnadensee. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Von den Bohrkernen aus dem Gnadensee liegen sechs ^{14}C -Datierungen vor (Tabelle 1). Es gibt keine gravierenden Abweichungen, d.h. die ^{14}C -Daten können alle mit den pollenanalytisch ermittelten Daten in Einklang gebracht werden. Wegen fehlender Makroreste, welche die zur AMS-Datierung notwendigen Masse (>3 mg Trockengewicht) hatten, konnten keine weiteren ^{14}C -Datierungen durchgeführt werden. Da im sedimentologisch untersuchten Bereich jeweils eine Kernhälfte (mit Ausnahme der für Dünnschliffeuntersuchungen entnommenen Bereiche) und auch die an den zum Liegenden hin anschließenden 1 m-Kernsektionen der Kerne Gn5, Gn6 und Gn7 geschlämmt wurden, kann von einem Fehlen und nicht von einem Übersehen der Makroreste ausgegangen werden.

2.2.2.3 Sedimentakkumulationsraten

Die Ablagerungen des Gnadensees weisen Sedimentakkumulationsraten zwischen 1,1 und 4,2 mm/a auf (Tabelle 3), wobei die Raten sich innerhalb eines Kernes variieren können (vergl. Bemerkungen zu Gn6). Die Raten ergeben sich sowohl bei Anwendung der palynologischen Datierungen über die jeweils untersuchte Kernstrecke, als auch unter der Berücksichtigung der einzelnen ^{14}C -Datierungen.

Wie für die Bohrkerne aus dem Nussbaumer See gilt auch für die Kerne aus dem Gnadensee, dass die Berechnung von Sedimentakkumulationsraten nur über weitere Zeiträume bzw. über hiatenfreie Kernsequenzen sinnvoll ist.

2.2.3 Diskussion und Zusammenfassung

2.2.3.1 Magnetische Suszeptibilität

Die Messungen der magnetischen Suszeptibilität ergeben für beide Seen ein sehr ähnliches Bild: Tone liefern immer, Sande meistens ein auswertbares Signal, sind aber im untersuchten Zeitraum nicht abgelagert worden. Die im Zeitfenster dieser Untersuchung abgelagerten Seekreiden, Kalkmudden und Torfe weisen eine negative bzw. extrem niedrige magnetische Suszeptibilität auf. Dies läßt den Schluß zu, dass hier weder ein Eintrag ferro- und/oder ferrimagnetischer Minerale von außen noch autochthone Bildung solcher Minerale stattfand.

Für den Bodensee-Gnadensee fällt auf, dass die Signalstärke in den Kernabschnitten mit silikatischem Sand nicht relevant zunimmt. Dies wäre im Vergleich zu Kern Gn1 zu erwarten gewesen, der ähnlich aussehende Sande enthält und Signale zwischen 60 und $100 \cdot 10^{-6}$ SI liefert. Das läßt den Schluß zu, dass die in Ufernähe sedimentierten grauen silikatischen Sande nicht die gleiche Zusammensetzung haben wie die näher der Halde abgelagerten Sande (die haldennah abgelagerten Sande scheinen ein Gemisch aus Seekreide und den bereits genannten grauen Sanden zu sein). Hierfür gibt es zwei Erklärungsmöglichkeiten: Unterschiedliche Liefergebiete brachten

unterschiedlich zusammengesetzte Sande. Oder Liefergebiet und ursprüngliche Zusammensetzung waren identisch und durch Transportprozesse kam es zu einer Sortierung. Durch diese wurden ferro-/ferrimagnetische Minerale nicht bis in Haldennähe transportiert.

2.2.3.2 Datierungen

Die Alter der Bohrkerne beider Seen konnten durch Pollenanalyse und ^{14}C -Datierungen bestimmt werden. Beiden Methoden ergänzen einander und widersprechen sich nicht. Hiaten treten lokal auf und erlauben am Gnadensee und bei den W-Kernen des Nussbaumer Sees keine sedimentologische Kernkorrelation. Wegen der Hiaten wäre eine bessere zeitliche Auflösung durch engere Pollenprobenabstände und weitere ^{14}C -Datierungen wünschenswert.

Im Folgenden werden zunächst die einzelnen Kerne diskutiert, anschließend werden die erstellten Altersmodelle besprochen.

In Kern NBS L2 stimmen die ^{14}C - und die archäologischen Datierungen gut überein. Die Siedlung, die auf ein Alter zwischen 2820 und 2750 BP cal datiert wurde (GOLLNISCH-MOOS 1999), liegt auf dem Torf (Baugrund) im Liegenden der Seekreide auf, ist somit auch stratigraphisch jünger als die ^{14}C -Datierungen aus 42-43 cm (3085 BP cal) und 45-47 cm (3180 BP cal), beide aus dem Übergangsbereich Kalkmudde/Torf. Beide Datierungen lassen sich gut mit der unter Nutzung der weiteren ^{14}C -Daten berechneten Sedimentationsrate korrelieren. Somit datieren diese ^{14}C -Daten den - möglicherweise durch die Transgression aufgearbeiteten - Torf. Aus der Differenz zwischen diesen ^{14}C -Datierungen und der archäologischen Datierung ergibt sich ein mindestens 200-jähriger Hiatus zwischen der Kalkmudde im Hangenden und dem Torf im Liegenden.

In NBS W3 tritt, im Gegensatz zu NBS W4, wahrscheinlich ein Hiatus im Zeitraum zwischen 4000 und 700 BP cal auf (M. Wehrli und Dr. M. Rösch). Das Zeitfenster 3500-1500 BP cal ist somit unvollständig oder bestenfalls in schlechter Auflösung (ca. 30 cm) erfasst.

Für den Markelfinger Winkel besteht eine gute Korrelation der palynologisch festgestellte Zeitmarken zwischen den einzelnen Kernen: Zeichnet man die Zeitmarken in den Transektplan ein, dann zeigt sich die Isochrone von 1400 BP cal als eine Gerade durch die Kerne Gn4-Gn6. Andere Isochronen sind aufgrund von Hiaten in Gn5 bzw. zu geringer Auflösung des Diagramms von Gn6 nicht festzulegen.

Interessant erscheint noch die ^{14}C -Datierung Gn7 18, deren Alter wegen der schlechten Kalibrationsmöglichkeit der letzten zwei Jahrhunderte als „absolutley modern“ zu bezeichnen ist: Sie belegt die rezente Sedimentation von Kalkmudde in diesem Teil des Gnadensees.

Auffallend ist die geringe Anzahl an Makroresten in den Bohrkernen des Gnadensees. Das Fehlen von Datierungen für den Zeitabschnitt von 3500-1200 BP cal fällt auch bei den Bohrkernen aus der Flachwasserzone vor Horn (RÖSCH 1993) auf. Würde die Anzahl der Datierungen für alle Zeiten gering sein oder völlig fehlen, könnte man dies auf die uferferne (150-200 m) Lage der Bohrkerne zurückführen: die Sedimentation größerer terrestrischer Makroreste findet nur ufernah statt, wegen fehlender Strömungen sinken diese Reste bereits in Ufernähe auf den Seegrund.

Dass die zu datierenden Makroreste in der hier vorliegenden Untersuchung aber mit einer Ausnahme (modernes Datum) aus dem Zeitbereich 1300-700 BP cal stammen (Tabelle 1), spricht für bevorzugte Zeiten der Ablagerung dieser terrestrischen Makroreste.

Als Ursache ist anthropogener Eintrag denkbar: Die Besiedlung verstärkte sich ab dem ausgehenden siebten Jahrhundert (1300/1400 BP cal) am Untersee (TESDORPF 1972). VOGT (in Vorber.) findet für die Zeit ab 1300 BP cal eine einsetzende Kolluvienbildung in den meisten von ihm untersuchten Lokalitäten der Halbinsel Höri, was ebenfalls eine verstärkte menschliche Tätigkeit in Form von geöffneten Flächen anzeigt. Wegen der anthropogen geöffneten Flächen kommt es bei Starkregenereignissen zu verstärkter Erosion und verstärkter Wasserführung der Bäche (fehlende Retention durch Vegetation) und dadurch zu einem erhöhten Eintrag von Makroresten in den See. Wahrscheinlich ist auch ein weiterer Transport in Richtung Seemitte durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit der Bäche.

Diese These wird von der Tatsache gestützt, dass es für die Zeit 1450-1150 BP cal Hinweise auf verstärkte Flussaktivität in Südmittleuropa in Form von subfossilen Bäumen gibt (BECKER 1982). Widersprüchlich zu dieser Annahme ist, dass BECKER (1982) auch eine verstärkte Flussaktivität

für den Zeitspanne 2050-1750 BP cal nachweisen kann, also für einen Zeitraum, für den aus den Seesedimenten keine Makroreste vorliegen.

Eine andere Erklärung für die in bestimmten Zeiträumen fehlenden Makroreste könnte ein erhöhter Wasserspiegel sein, sodass die untersuchten Bereiche noch weiter vom Ufer entfernt waren.

Aufgrund der sich widersprechenden Faktenlage ist eine eindeutige Erklärung für das Fehlen von terrestrischen Makroresten in den uferfernen Litoralsedimenten des Untersees aus dem Zeitraum 3500-1200 BP cal nicht möglich.

Zur landschaftsgeschichtlichen Interpretation der Analysendaten ist eine zeitliche Einordnung der jeweiligen Phänomene notwendig. Die Alterseinstufung erfolgt anhand von Altersmodellen, die für jeden Bohrkern separat erstellt wurden (Kap. 6.2.3). Dabei wurden die jeweiligen ^{14}C -Daten berücksichtigt und das Sedimentalter mittels der errechneten Sedimentakkumulationsraten linear extrapoliert. Die aufgrund der archäologischen Befunde ermittelten Datierungen für NBS L2 wurden dazu berücksichtigt.

Bei den Bohrkernen aus dem Gnadensee lagen im und in unmittelbarer Nähe des untersuchten Kernabschnitts keine ^{14}C -Daten vor; hier wurden die pollenanalytisch gewonnen Daten hinzugezogen; d.h. aus den in Tabelle 3 für die untersuchten Kernabschnitte angegeben Sedimentationszeiträume wurden die jeweiligen Sedimentalter errechnet (ebenfalls linear).

Diese Modelle können lediglich wichtige Anhaltspunkte für das Alter liefern, da ohne genaue palynologische Untersuchung, bzw. ohne weitere ^{14}C -Daten, kleine Hiaten nicht ausgeschlossen werden können. In Kernen mit diskordanten Schichtwechseln, wie z.B. Gn5, sind Hiaten sogar wahrscheinlich. Dieser Unsicherheit wird in der abschließenden Diskussion bei dem Vergleich der Kerne Rechnung getragen.

2.2.3.3 Sedimentakkumulationsraten

Hier werden zunächst die einzelnen Kerne untereinander und anschließend beide Seen miteinander verglichen. Abschließend werden die in Rahmen dieser Arbeit gefundenen Akkumulationsraten mit Literaturdaten verglichen.

Der Unterschied der Sedimentakkumulationsrate von NBS L2 und NBS W4 (Tabelle 2) kann durch die Lage der Kerne erklärt werden: L2 liegt in einer ehemaligen flachen, weitgehend abgeschlossenen Bucht, während W4 in mehr als 7 m Wassertiefe im größten Becken des Sees liegt. Für dieses Becken, den eigentlichen See, muß wegen des Auftretens von sessilen Algen und Algen im Freiwasser, deren Anzahl in der Bucht als geringer anzunehmen ist, von einer höheren Karbonatproduktion ausgegangen werden. Zudem wurde an der Lokalität des Kernes W4 mehr organische Substanz sedimentiert (s.a. Abbildung 27).

Die auffallend niedrige mittlere Sedimentakkumulationsrate in Kern NBS L10 bestätigt die aufgrund der scharfen Schichtgrenzen für diesen Kern postulierten Hiaten (Kap. 2.2.1.3). Wären keine Hiaten vorhanden, wäre die Sedimentmächtigkeit höher und die Sedimentakkumulationsraten dadurch ebenfalls höher.

Im Bodensee-Gnadensee enthält der Kern Gn4 die jüngsten Sedimente und die höchste Sedimentakkumulationsrate (Tabelle 3). Bei Kern Gn7 treten in Zusammenhang mit der ¹⁴C-Datierung aus 0,18 m Tiefe, d.h. unter Einbeziehung der „modernen“ Sedimente, die höchsten Sedimentakkumulationsraten auf. Hier zeigt sich die Zunahme der Akkumulationsraten seit etwa 1500-2000 BP cal, wie sie auch von anderen Autoren (Ammersee KLEINMANN 1995, Bodensee-Untersee NEUKIRCH 1993 und RÖSCH 1993, Attersee BEHBEHANI et al. 1986) festgestellt wurde.

Am Bodensee-Gnadensee ist eine Abhängigkeit der Sedimentakkumulationsrate von der Entfernung zum Ufer oder zwischen Sedimentakkumulationsrate und Wassertiefe nicht zu erkennen.

Der Bodensee-Gnadensee weist mit 1,1-4,2 mm/a eine ähnliche Sedimentakkumulationsrate auf wie der Kern NBS W4 aus dem unteren Abschnitt der Halde des Nussbaumer Sees (Tabellen 2 und 3). Dies deckt sich mit RÖSCH (1997). Er hat im Litoral des Untersees eine Abhängigkeit der Sedimentakkumulationsrate von der Position relativ zum Ufer und zum Wasserspiegel festgestellt: an der Halde, d.h. in mittleren Wassertiefen, ist die Sedimentation am größten.

Von diesem Modell ausgehend, kann angenommen werden, dass die größte Sedimentmenge im Gnadensee jeweils an der Halde sedimentierte. Dies zeigt sich in der hier vorliegenden

Untersuchung nicht, es gibt jedoch aufgrund der zeitlichen Auflösung der Sedimentakkumulationsrate auch keine Hinweise auf deren Abhängigkeit von anderen Faktoren.

Das Sedimentationsmodell von RÖSCH (1997) unterstützt die These, dass die untersuchten Sedimente des Kerns NBS L2 unter relativ geringer Wasserbedeckung abgelagert wurden (geringe Sedimentakkumulationsrate).

Aus der Literatur ist eine weite Spanne der Sedimentakkumulationsraten bekannt (Tabelle 4). Die in dieser Arbeit gefundenen mittleren Akkumulationsraten des Nussbaumer und Bodensees (Tabellen 2 und 3) sind verglichen mit den Literaturdaten stimmig. Eine Ausnahme bildet der Kerns Gn4, der wegen seines insgesamt jungen Alters (jünger als 1800 BP cal) eine erhöhte Sedimentakkumulationsrate aufweist.

See	Bielersee	Thunersee	Seekreide, allgemein	Bodensee- Untersee, Profundal	Bodensee- Untersee, Litoral	Bodensee- Obersee, Profundal	Nussbaumer See
Akkumu- lations- rate [mm/a]	0,5-3,6	<0,5->2,0	0,22-1,06	1- >4 (spätes/ mittleres Subboreal: 1)	1- >4	0,4-1 (Sedimen- tations- rate)	0,1- >3 (junges Sub- boreal/ älteres Sub- atlantikum: 0,7-1,6)
Autor	FURGER 1980	MATTER & STURM 1982	JUNG 1994	NEU- KIRCH 1993	RÖSCH 1993, 1997	WESSELS 1995	RÖSCH 1983

Tabelle 4: Sedimentakkumulationsraten verschiedener Seen zum Vergleich mit den Werte aus dem Nussbaumer See und dem Bodensee-Untersee

Die Sedimentakkumulationsraten bewegen sich am Nussbaumer See und am Bodensee zwischen 1,1 und 4,2 mm/a. Lediglich die L-Kerne des Nussbaumer Sees weisen mit 0,1-0,4 mm/a geringere Raten auf. Alle Werte ähneln den von anderen Autoren gefundenen Sedimentakkumulationsraten. Dies stützt die Annahme, dass die Sedimentationsrate nicht durch die Größe eines Sees bestimmt wird, sondern, zumindest teilweise, durch die Fazies.

Weiterhin zeigt die erhöhte Akkumulationsrate von Kern Gn4, dass der Mensch im o.g. Zeitraum am See einen Einfluß auf die Akkumulationsrate gehabt hat.

Insofern wäre eine Berechnung der Sedimentakkumulationsraten für bestimmte Zeitabschnitte (mit/ohne Besiedlung, unterschiedliche bekannte Klimaphasen) wünschenswert.

2.3 Partikelanalyse

Unter Partikelanalyse wird hier die mikroskopische Begutachtung der Einzelbestandteile und deren Mengenverhältnisse zueinander verstanden. Die Partikelanalyse soll Hinweise auf anthropogenen und terrigenen Einfluß sowie Indizien für Seespiegelschwankungen liefern. Nach MAGNY (1992 a, b) sind folgende drei Kalkkonkretionstypen charakteristisch für bestimmte Tiefenzonen eines Sees: Onkolithe dominieren in direkter Ufernähe, blumenkohlförmige Konkretionen sind typisch für die Flachwasserzone, plattenförmige Konkretionen treten gehäuft an der Haldenkante auf, während (kleine) röhrenförmige Konkretionen an der Halde überwiegen. Als weitere Partikelklassen sind zu nennen (nach der Häufigkeit ihres Auftretens): organische Partikel, eckige Kalkkonkretionen (häufig Bruchstücke der genannten Konkretionstypen oder Zusammenballung feiner Substanz), Schill, Mineralkörner (Silikate), Oogonien (Fortpflanzungseinheiten der Armleuchteralgen=Characeae, verkalkt oder unverkalkt), Operculi (Deckel von Gastropoden, HENNIG 1972) und Holzkohle.

Näheres zur Methodik und den Partikelklassen siehe Kapitel 6.1.4.

Im Folgenden gibt die Probenbezeichnung jeweils die Unterkante der entnommenen Probe an. Die Mächtigkeit einer Probe beträgt in der Regel einen Zentimeter, in Ausnahmefällen bis zu 3 cm in Anpassung an die Schichtmächtigkeit. In Kapitel 6.2.2 im Anhang sind die zugehörigen Probenoberkanten und Schichtmächtigkeiten angegeben.

2.3.1 Nussbaumer See

Hier wurden die Partikel der Kerne NBS L2 und NBS W4 betrachtet. Ausgewählte Proben von Kern L2 wurden doppelt bearbeitet, da die Methode nach der ersten Begutachtung modifiziert werden musste: Probenaufbereitung, ausgezählte Fraktion und die Zuordnung bestimmter plattiger und runder Kalkkonkretionen mussten optimiert werden (vergl. Kapitel 6.1.4).

Zunächst sollen die Ergebnisse der beiden Aufbereitungs- und Untersuchungszyklen für sich betrachtet, dann verglichen werden.

In der ersten Untersuchungsreihe wurde die Fraktion 0,2-0,63 mm des Kern NBS L2 ausgezählt (Abbildung 8). Hier dominiert der organische Anteil in den obersten zwei Proben des Kerns und

in den Proben zwischen 24 und 45 cm. In den Proben unterhalb von 45 cm geht die Menge an organischen Partikeln zunächst zugunsten der karbonatischen Konkretionen, dann zugunsten der silikatischen Komponente zurück.

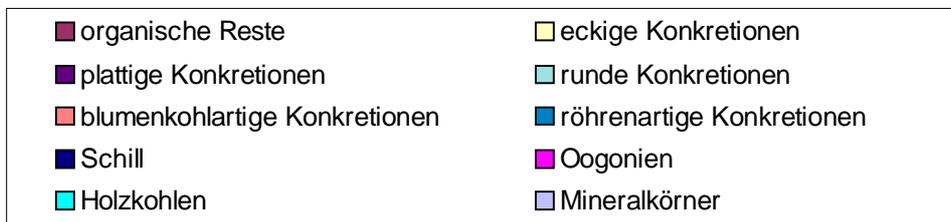
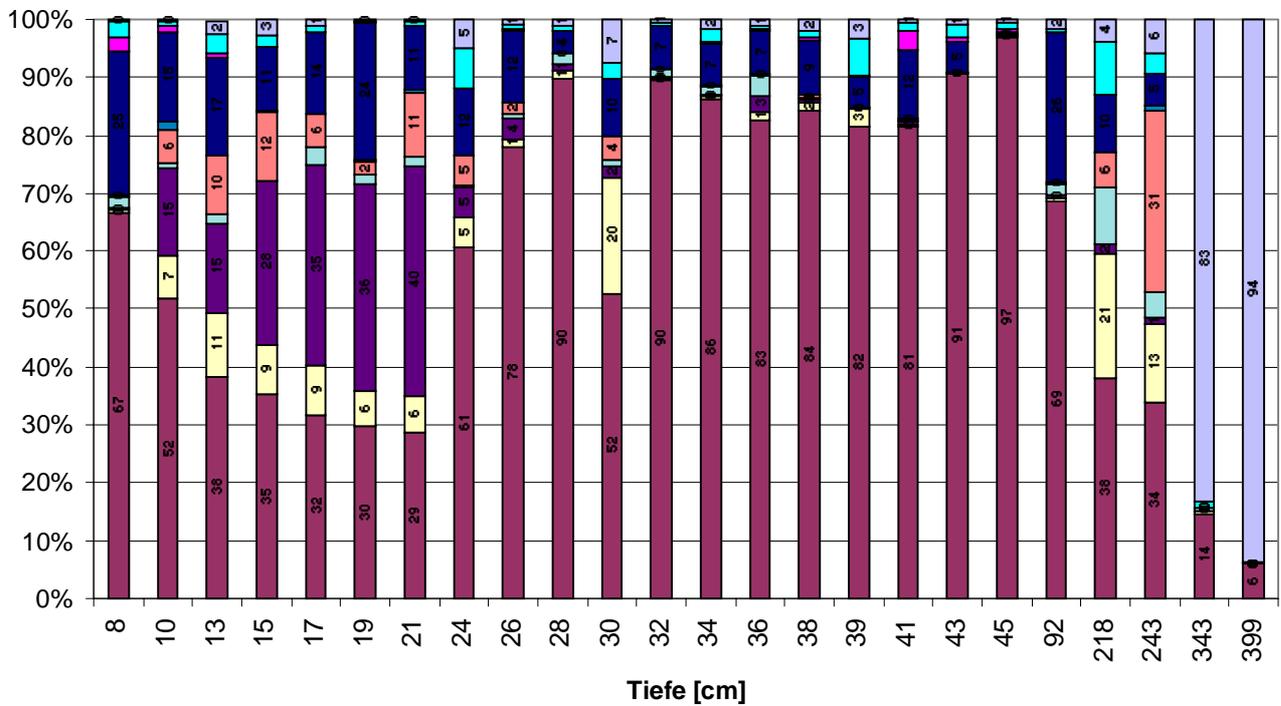
In den Proben zwischen 10 und 21 cm nimmt der Anteil organischer Partikel kontinuierlich ab; gleiches gilt in schwächerer Ausprägung für die eckigen Konkretionen. Der Anteil an plattigen Kalkkonkretionen nimmt in der selben Richtung zu. Die weiteren Bestandteile weisen in diesem Kernabschnitt keinen Trend auf. Bei den weniger häufigen Bestandteilen (Oogonien, Operculi, Holzkohlen, z.T. auch Mineralkörner) fällt auf, dass Oogonien nicht in den Schichten mit hohem Konkretionsanteil, aber in Proben mit hohem organischem Anteil vorkommen. Die Holzkohlenverteilung schwankt zwischen weniger als einem Prozent und neun Prozent der Gesamtpartikelzahl. Ein Trend ist dabei, auch für Teilbereiche, nicht sichtbar.

Vom zweiten Aufbereitungszyklus wurde die Fraktion 0,5-2 mm ausgezählt (Abbildung 8). Es wurden im Unterschied zu Aufbereitungszyklus I stark angerundete Konkretionen nicht den runden Konkretionen, sondern den eckigen Konkretionen zugerechnet. Ebenso wurden die Merkmale der plattigen Konkretionen enger gefasst, d.h. flache Zusammenballungen feinsten Bestandteile wurden hier ebenfalls den eckigen Konkretionen zugeschlagen (s.a. Methodik Kapitel 6.1.4). Sowohl die angerundeten wie auch die flachen Zusammenballungen feinsten Partikel bilden sich nicht in bewegtem flachem Wasser bzw. an den Wasserpflanzen, sondern wahrscheinlich erst durch die Probenaufbereitung.

Die Verteilung der im zweiten Aufbereitungszyklus ausgezählten Partikel ist in Abbildung 8 dargestellt. Aufgrund der Probendichte können die Veränderungen über die Kerntiefe nur als Tendenz betrachtet werden. Der organische Anteil nimmt zunächst (vom Hangenden zum Liegenden) zugunsten der eckigen und der plattigen Konkretionen ab, ab Probe 24 zeigt dann der organische Anteil wieder steigende Tendenz auf Kosten der eckigen Konkretionen. Die Menge plattiger Konkretionen weist einen fallenden Trend in den Proben 10-24 auf. Der Schillanteil zeigt in den Proben 8-17 sinkende Tendenz. Holzkohlen kommen nur in Probe 8 vor.

NBS L2

a)



b)

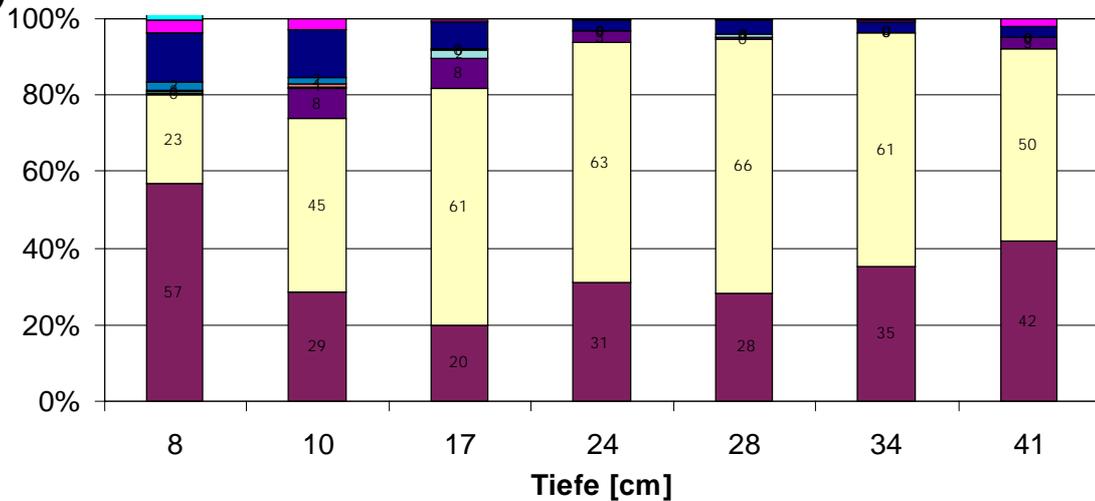


Abbildung 8: Partikelverteilung Nussbaumer See L2: a) 0,2-0,63 mm Probenaufbereitungszyklus I; b) 0,5-2 mm Probenaufbereitungszyklus II. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Vergleichen wir nun die beiden Untersuchungsreihen: Der Anteil organischer Partikel an der Gesamtzahl liegt in der zweiten Untersuchungsreihe zwischen 10% und 50% unter dem in der ersten Untersuchungsreihe. Somit sind die organischen Bestandteile in der Fraktion 0,2-0,63 mm angereichert. Die Menge der Konkretionen ist im zweiten Aufbereitungszyklus höher als im ersten. In der ersten Untersuchungsreihe dominieren die plattigen Konkretionen, in der zweiten die eckigen (s.a. die folgenden Abschnitte). Oogonien treten in beiden Untersuchungsreihen in den gleichen Proben und in ähnlichen Mengenanteilen auf. Holzkohlen kommen in der ersten Untersuchungsreihe häufiger vor als in der zweiten. Dies dürfte, wie schon bei den organischen Partikeln, ein Korngrößeneffekt sein.

Der über den Kernverlauf schwankende Anteil der für die Rekonstruktion des Wasserspiegels relevanten Konkretionen soll nun näher betrachtet werden. Dazu wird nicht die Gesamtpartikelzahl als Grundmenge benutzt, sondern die Gesamtanzahl der Konkretionen. Bei einer Konkretionsanzahl <200 (Tabelle 5) ist ein sinnvoller Vergleich mit anderen Proben aus statistischen Gründen nicht möglich ist (s. Kap. 6.1.4).

Probe	8	10	13	15	17	19	21	24	26	28	30	32
Anzahl	44	558	481	568	769	652	1092	229	101	95	314	58
Probe	34	36	38	39	41	43	45	92	218	243	343	399
Anzahl	26	163	44	49	13	5	11	75	702	517	17	0

Tabelle 5: Anzahl der je Probe gezählten Konkretionen in Kern NBS L2 0,2-0,63 mm, Aufbereitungszyklus I. Die grau unterlegten Felder markieren Proben mit einer Gesamtzahl unter 200.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst Aussagen zum Vergleich zwischen dem Bereich oberhalb und dem Bereich unterhalb von 45 cm getroffen, dann wird auf die Konkretionen aus den Proben zwischen 8 und 45 cm in beiden Aufbereitungszyklen eingegangen. Die daraus rekonstruierten Wasserspiegelschwankungen werden im Kapitel 2.3.3 dargestellt.

Vergleicht man die Proben aus dem Bereich zwischen 8 cm und 45 cm, die eine kontinuierliche Abfolge in der Zeit darstellen, mit den älteren Einzelproben (92-343 cm), so können folgende Schlüsse gezogen werden: die Konkretionsverteilung einiger älterer Proben ähnelt manchen jüngeren Proben, zu anderen jüngeren Proben lassen sich Unterschiede feststellen.

Würde man eine über die Zeit gleichmäßige Auffüllung des Sees bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen (Trophiegrad, Flora) annehmen, dürften die älteren Proben keiner Probe aus der jüngeren Sequenz gleichen, man würde eine Sukzession von Anzeigern tieferen Wassers zu Anzeigern flacheren Wassers erwarten. Da dies nicht der Fall ist, müssen sich Seespiegel und/oder Rahmenbedingungen geändert haben.

Die Proben aus dem Tiefenbereich 92-343 cm bilden keine zeitlich geschlossene Abfolge und können daher nicht zur Rekonstruktion von Seespiegelbewegungen genutzt werden.

Es folgt die Betrachtung der Konzentrationsänderungen der Konkretionen in der zeitlich (weitgehend) geschlossenen Probenfolge zwischen 41 und 78 cm, sowohl im ersten als auch im zweiten Aufbereitungszyklus:

Erster Aufbereitungszyklus (Abbildung 8, es werden ausschließlich die Konkretionen in den Proben 8-30 betrachtet): Im Kernbereich zwischen Probe 10 und 24 sind die plattigen Konkretionen dominierend. Die eckigen Konkretionen überwiegen in Probe 30. Die blumenkohlartigen Konkretionen kommen in allen Proben mit Ausnahme der Proben 8 und 28 vor. Röhrenartige Konkretionen treten in Probe 10 und in den Proben 15-24 als Einzelstücke oder in geringer Anzahl auf. Runde Konkretionen sind in allen Proben außer in Probe 15 vorhanden.

Im zweiten Aufbereitungszyklus (alle Zählsummen >200) ergibt sich folgendes Bild der Konkretionsverteilung (Abbildung 9, mit „(II)“ bezeichnete Proben):

Die eckigen Konkretionen treten in allen Proben am häufigsten auf. Blumenkohlartige Konkretionen kommen nur in Probe 10 vor (wenige). Röhrenartige sind ebenfalls nur in Probe 10 (wenige) vertreten. Runde Konkretionen sind in allen Proben außer in Probe 24 und 41 in geringer Anzahl vorhanden. Die plattigen Konkretionen nehmen von Probe 10 bis Probe 34 kontinuierlich zu. In Probe 8 treten sie in geringer Menge in Probe 41 in mittlerer Menge auf.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Aufbereitungszyklen (Abbildung 9), so sind die zu Beginn des Kapitels 2.3.1 genannten methodischen Änderungen deutlich zu sehen: runde und plattige Konkretionen kommen seltener, eckige Konkretionen häufiger vor. Das fast völlige Fehlen

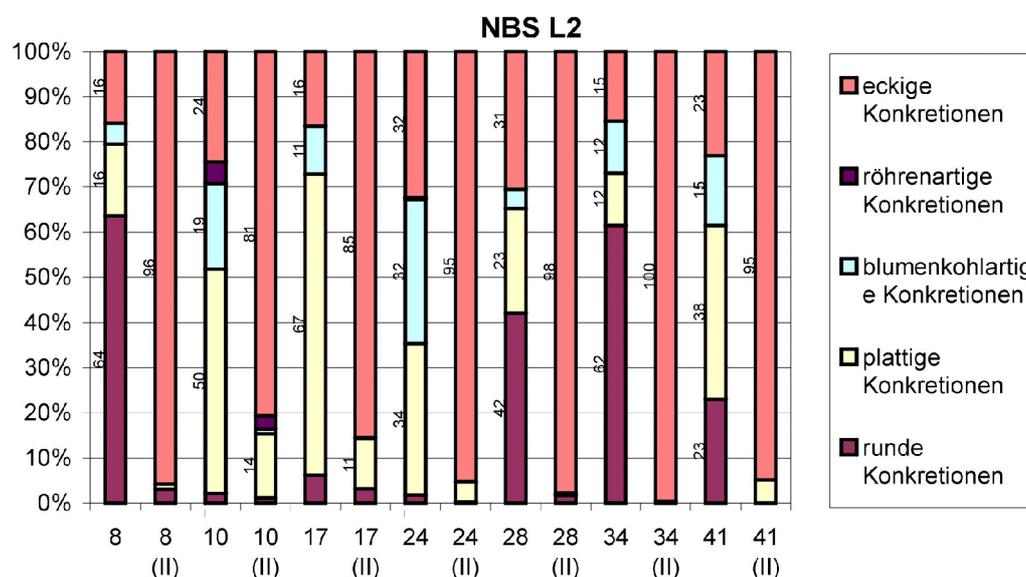


Abbildung 9: Vergleich der Untersuchungsreihen I und II ausgewählter Proben von NBS L2. Die Summe aller Konkretionen bilden 100%; die Angabe im jeweiligen Balkenabschnitt gibt den Anteil des Konkretionstyps an.

der blumenkohlartigen Konkretionen in Untersuchungsreihe II läßt sich durch die Anreicherung dieses Konkretionstyps in der kleineren Fraktion nur unzureichend erklären. Als Erklärung sind Verschiebungen bei den zugrunde liegenden Auswahlkriterien denkbar. Das Auftreten der röhrenartigen Konkretionen in Probe 10 stimmt in beiden Zyklen gut überein, der Unterschied in Probe 24 (nur in der ersten Untersuchungsreihe, geringe Menge) muß ohne Erklärung bleiben. Beide Proben sind statistisch gut abgesichert.

Die Partikelzusammensetzung von Kern NBS W4 ist nur bedingt mit der von L2 zu vergleichen, da eckige und runde Konkretionen in Kern W4 meist eine Zusammenballung feinsten organischer Bestandteile und feinsten Kalkpartikel sind. In den Fraktionen $> 0,5$ mm sind die Konkretionen dieser Art erst durch die Probenaufbereitung (Schütteln) entstanden. Die Menge organischer Partikel (Abbildung 10) bewegt sich mit 17%-67% in einem ähnlichen Bereich wie in Kern L2. Auffallend sind die niedrigen Werte für Schill von 178-205 und die mit Ausnahme von Probe 204 im Vergleich zu L2 hohen Anteile an Mineralkörnern.

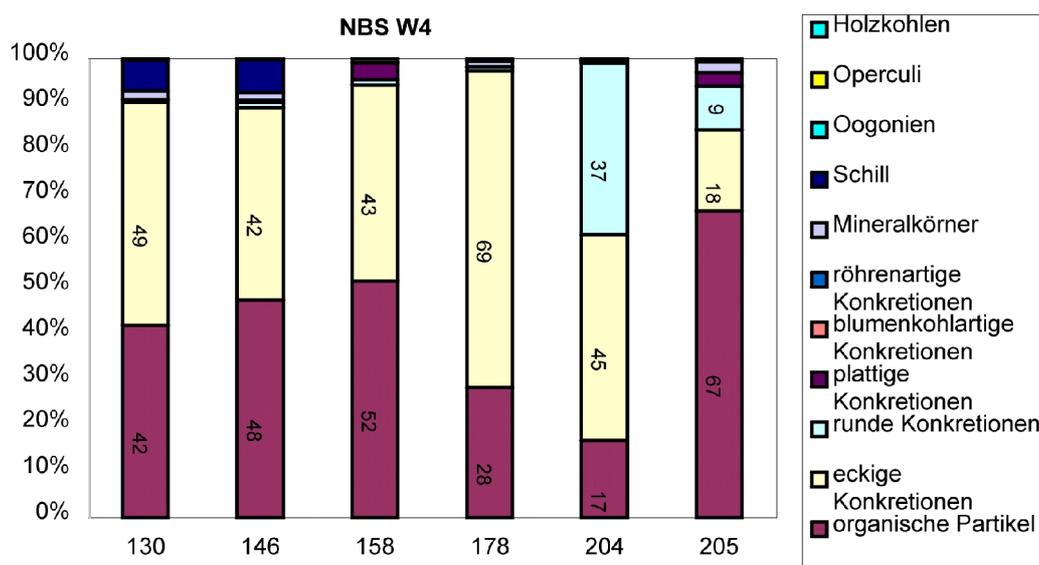


Abbildung 10: Partikelverteilung in Kern NBS W4 (100%=Gesamtpartikelanzahl). Zu beachten ist, dass runde und eckige Konkretionen meist durch die Probenaufbereitung entstanden.

Wegen fehlender aussagekräftiger Konkretionen in Kern W4 gibt es hier keine Hinweise auf Wasserspiegelschwankungen. Die Fazies, aus der dieser Kernbereich stammt, liegt in tieferem Wasser als die zeitgleichen Sedimente in Kern L2 (L2 heute landfest, W4 heute in 5 m Wassertiefe, vergleiche auch Kapitel 1.2.1). In dieser größeren Wassertiefe gelangten keine Konkretionen zur Ablagerung.

2.3.2 Bodensee-Gnadensee

Aus dem Gnadensee wurden Proben der Kerne Gn5 (Markelfinger Winkel) und Gn7 (Nähe Reichenau) untersucht. Da in den Fraktionen 0,5-0,63 und 0,63-2 mm oft nur >400 Partikel vorhanden sind, wurden diese zwei Fraktionen zur Fraktion 0,5-2 mm zusammengefasst.

In Gn5 wird die Zusammensetzung durch Schill und eckige Konkretionen dominiert (Abbildung 11 a). Ein Trend in deren Anteilsänderungen über die Kerntiefe ist nicht zu erkennen. Organische Partikel spielen mit 2% bis maximal 31% eine untergeordnete Rolle. Operculi treten auffälligerweise in allen Proben außer in 510 und 538 auf. Oogonien kommen nur in den Proben 496 und 510, also in den stratigraphisch obersten Proben vor. Die Partikelverteilung korreliert weitgehend mit der makroskopischen Ansprache: die organischen Partikel sind in der dunkelsten Schicht am

stärksten vertreten, tendenziell gilt, je heller eine Schicht ist, desto größer ist der Schill- und Konkretionsanteil. Konkretionen (ausgenommen eckige) haben in Gn5 in den Proben 496-538 und in Probe 560,5 einen nennenswerten Anteil an der Gesamtpartikelzahl. Bei Betrachtung der Konkretionen muß man berücksichtigen, dass runde und eckige Konkretionen in den Proben 496, 510, 538 und 561 als solche betrachtet werden können, in den anderen Proben aber Artefakte der Probenaufbereitung (s. folgende Abschnitte und Kap. 6.1.4) sind. Es fällt auf, dass ausschließlich in den

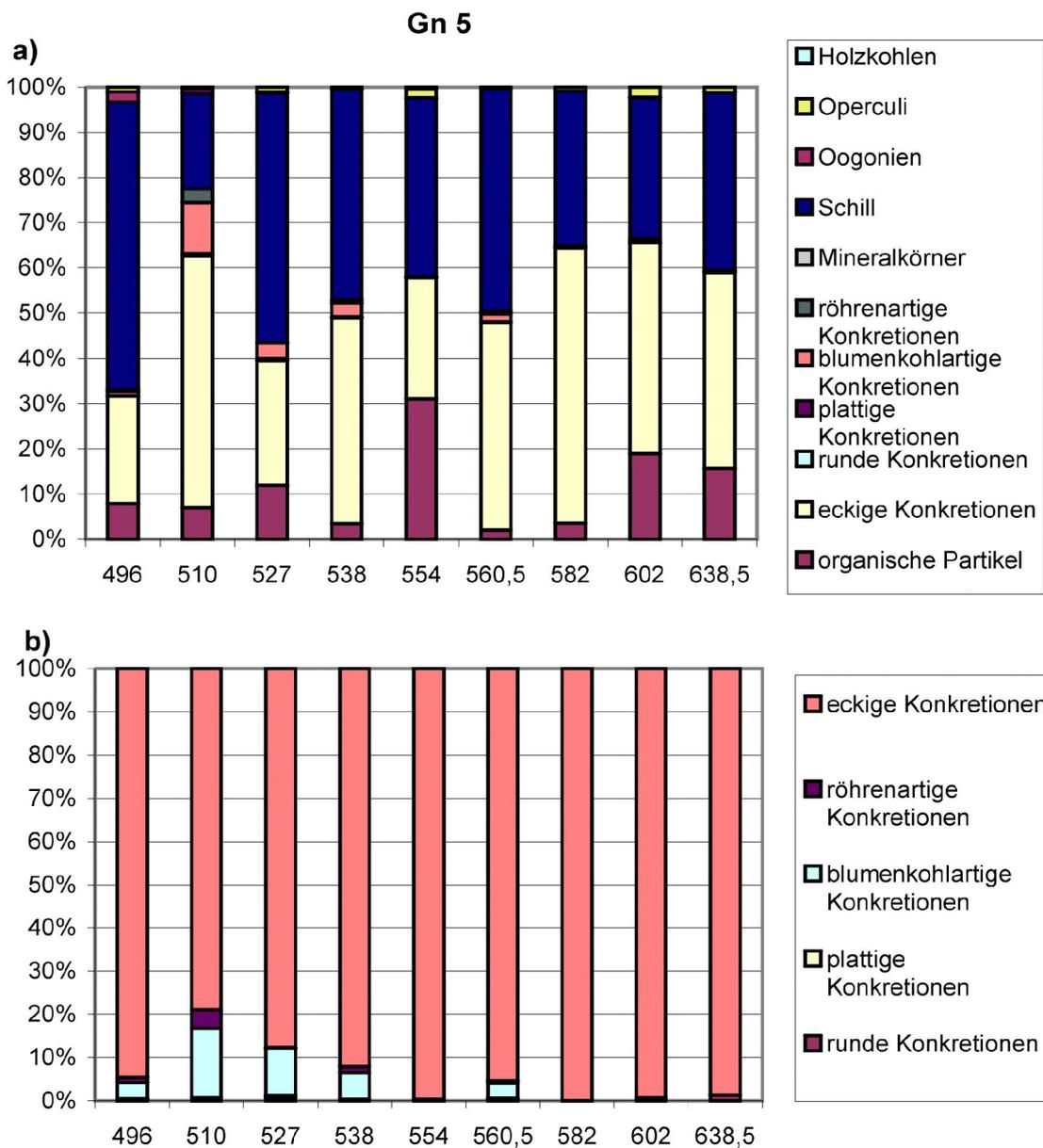


Abbildung 11:Bohrkern Gn5 a) Partikelverteilung b) Konkretionsverteilung. Weitere Beschreibung siehe Text

Proben mit „echten“ Konkretionen auch verschiedene Typen vorkommen (Ausnahme: 527, Abbildung 11b). Röhrenartige Konkretionen treten weniger häufig als blumenkohlartige Konkretionen auf. Plattige Konkretionen kommen mit 1% nur in Probe 510 vor.

Auch in Gn7 sind Schill und eckige Konkretionen die dominierenden Partikelklassen (Abbildung 12). Dabei überwiegt in vier der sechs Proben der Schillanteil: in den beiden stratigraphisch mittleren Proben 497 und 517 ist die Schillmenge mit 45% bzw. 37% zugunsten der Konkretionen rund 20% niedriger als in den anderen Proben. Der Anteil organischer Partikel ist mit 5%-13% der niedrigste in allen betrachteten Kernen. Operculi kommen mit Ausnahme der Proben 447 und 527 in allen Proben vor.

In Probe 497 und 517 treten eckige und runde Konkretionen im eigentlichen Sinne auf, daneben kommen noch ähnlich aussehende Konkretionen als Artefakt der Probenaufbereitung vor. Diese Artefakte entstehen durch das Schütteln zum Dispergieren der Probe: Partikel $<0,063$ mm ballen sich zusammen oder sind bereits verbacken und werden durch die Bewegung im Wasser zur gerundeten Konkretion. Zerbricht diese, ist sie eckig und wurde folglich zu den eckigen Konkretionen gezählt. Diese Artefakte treten in allen Proben auf. In den zwei vorgenannten Proben 497 und 517 treten, neben eckigen und runden, auch blumenkohlartige Konkretionen auf. Plattige Konkretionen kommen mit 1% in Probe 447 vor.

2.3.3 Diskussion und Zusammenfassung

Zunächst sollen hier Unterschiede und Ähnlichkeiten der verschiedenen Kerne besprochen werden. Anschließend werden auf Basis der Konkretionsverteilung Wasserspiegelbewegungen rekonstruiert. Es folgt eine kurze Zusammenfassung der Befunde.

Vergleicht man die Partikelverteilung der beiden Lokalitäten Nussbaumer See und Bodensee-Gnadensee miteinander, so fällt der unterschiedliche Gehalt an organischen Partikeln auf (alle Werte jeweils Durchschnittswerte): 35% in NBS L2 (Probenreihe II: 0,5-2 mm; in Probenreihe I 0,2-0,63 mm: 66%), 42% in NBS W4, 11% in Gn5, 9% in Gn7. Dabei ist unter „organischen Partikeln“ nicht allgemein „organische Substanz“ zu verstehen, die auch in den feineren Fraktionen auftritt. Die Partikelarmut in den Kernen aus dem Gnadensee stimmt mit dem seltenen Auftreten

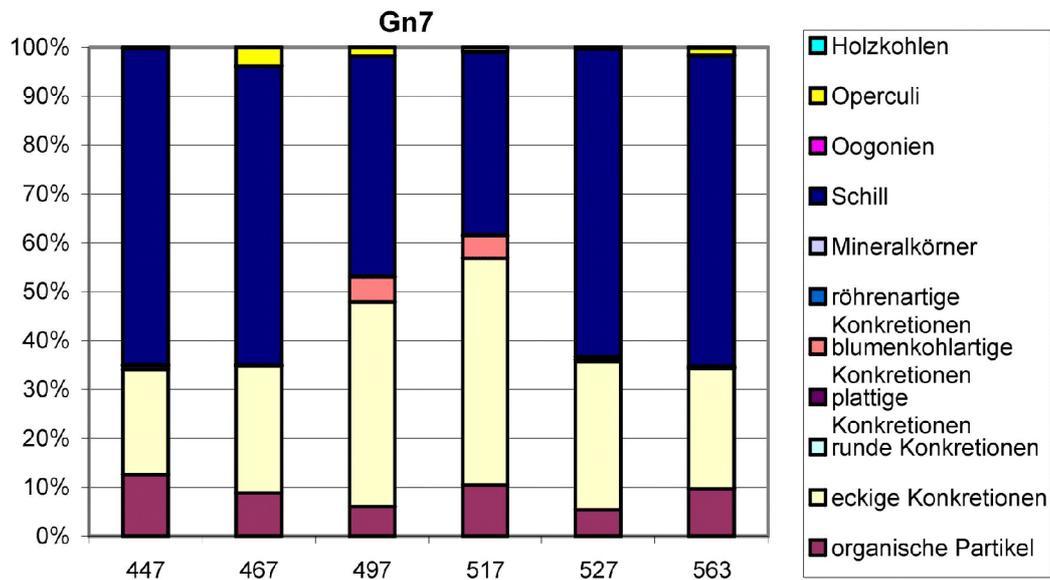


Abbildung 12: Partikelverteilung in Kern Gn7. Nähere Erläuterungen siehe Text.

von Makroresten überein (s. Kap. 2.2.3.2). Die unterschiedlichen Gehalte beider Lokationen spiegeln in erster Linie die Verfügbarkeit größerer organischer Partikel wieder. Am Nussbaumer See sind beide Kerne maximal 50 m vom angenommenen ehemaligen Ufer entfernt, am Bodensee 300 m. Es muß davon ausgegangen werden, dass organische Partikel $>0,5$ mm bereits in Ufernähe sedimentiert werden (vergl. a. MAGNY et al. 1995). Ein weiterer, wenn auch unwahrscheinlicher Grund für die relativ wenigen organischen Partikel in den Gnadenseekernen, könnten windinduzierte Strömungen im Gnadensee sein, die eine Sedimentation größerer organischer Bestandteile verhindern. Gegen letztere These spricht, dass im Gnadensee keine gerichteten ufernahen Strömungen bekannt sind (SCHRÖDER, R. 1974).

Der Schillanteil beider Lokalitäten verhält sich umgekehrt zum Anteil der organischen Partikel (Durchschnittswerte NBS L2: 6% (Probenreihe II), NBS W4:2%, Gn5: 42%, Gn7: 56%). Am Nussbaumer See ist Schill somit ein Nebenbestandteil, während er im Gnadensee zu den Hauptkomponente zählt, lokal auch schichtbildend ist. Schließt man von der Taphozönose auf die Biozönose, so bedeutet das, dass es im Gnadensee über den ganzen Untersuchungszeitraum eine größere Molluskenpopulation gab.

Möglicherweise bietet ein großer See bessere Lebensbedingungen für Mollusken als ein kleiner, da die Flachwasserzone des großen Sees hier breiter ist und dieser aufgrund seiner Größe langsamer eutrophiert. Ausnahme ist nur Probe Gn5 510 mit nur 21% Schillanteil. Dieser These

widerspricht die Tatsache, dass im Nussbaumer See bei der Probenahme die Auflösung größerer Molluskenschalen festgestellt werden konnte. Somit kann die Diskrepanz in den Molluskenanteilen beider Seen möglicherweise auch durch den unterschiedlichen Grad der Erhaltung bedingt sein. Ein weiterer Erklärungsansatz ist die bei Starkwindlagen sicher höhere Wellenenergie (nicht Strömungsgeschwindigkeit) im Gnadensee: hier könnten die Mollusken stärker fragmentiert werden als im Nussbaumer See und so zahlenmäßig vermehrt auftreten.

Aussagen zu Wasserspiegelschwankungen aufgrund der Kalkkonkretionen lassen sich anhand von Kern L2 für den Nussbaumer See treffen. Die anderen drei untersuchten Kerne besitzen zu wenige oder nur in Teilbereichen auswertbare Konkretionen. Im letzteren Fall ist eine Pegelrekonstruktion nicht möglich, da die Wasserstandsveränderungen in den älteren und jüngeren, nicht auswertbaren Kernabschnitten nicht nachvollzogen werden können und die Sedimentfazies ohne Hinweis auf den Wasserstand wechselt.

Ein möglicher Grund für den Unterschied von L2 zu den anderen drei Kernen ist die Wassertiefe, die die Fazies stark prägt. W4, Gn5 und Gn7 sind aus Wassertiefen >2 m genommen, bei L2 muß man, wegen der fehlenden wasserbeeinflussten Sedimente in höheren stratigraphischen Positionen, zum Zeitpunkt der Seekreideablagerung von einer Wassertiefe von maximal 2 m ausgehen.

Es folgen die Ergebnisse der Konkretionsanalyse von Kern NBS L2. Die zwei Untersuchungsreihen widersprechen sich nicht in ihren Aussagen bezüglich Wasserspiegelschwankungen. Reihe II ist die Bestätigung von Reihe I, kann wegen der geringen Probindichte aber nicht alleine zur Pegelrekonstruktion dienen. In Abbildung 13 ist die Verteilung der plattigen, blumenkohlartigen und röhrenartigen Konkretionen zu sehen. In den schraffierten Bereichen sind die Ergebnisse statistisch nicht relevant. Da stratigraphisch oberhalb und unterhalb des dargestellten Bereichs Torf bzw. organisches Sediment anzutreffen ist, war der Wasserspiegel vor und nach Ablagerung der gezeigten Kalkmudde- bzw. Seekreideschicht tiefer als während deren Sedimentation.

Mit der Interpretation der Konkretionen wird vom Liegenden zum Hangenden, also von alt nach jung, ab der statistisch relevanten Probe 24 fortgefahren. Die Zuordnung der Konkretionen zu Faziesbereichen erfolgt nach MAGNY (1992 a, b).

Zunächst sind die blumenkohlartigen Konkretionen stark vertreten (24 cm, typisch für den uferferneren Flachwasserbereich, d.h. für die Uferbank).

Während die blumenkohlartigen Konkretionen abnehmen, nehmen die röhrenartigen zu (21 cm). Sie sind typisch für die Halde. Der Pegel ist somit gestiegen.

Im Folgenden dominieren die plattigen Konkretionen (19 cm), die für die Haldenkante sprechen. Der Wasserspiegel ist leicht gesunken oder gleich geblieben (die Signifikanz der Zunahme der röhrenartigen Konkretionen ist fraglich).

Weiter zum Hangenden (17 cm) nehmen die blumenkohlartigen Konkretionen auf Kosten der plattigen zu. Dies indiziert einen sinkenden Wasserspiegel. Die im Folgenden (15 cm) auftretenden röhrenförmigen Konkretionen passen nicht zu dieser Aussage; die Signifikanz der röhrenartigen Konkretionen muß wegen der nur geringen Zunahme in Frage gestellt werden.

Die in der folgenden Probe (13 cm) verstärkt vorkommenden blumenkohlartigen Konkretionen zeigen eine leichte Wasserüberdeckung dieser Lokalität an.

Die in der vorletzten Probe (zum Hangenden hin betrachtet, 10 cm) stark auftretenden röhrenartigen Konkretionen, das Zurückgehen der blumenkohlartigen sowie die schwache Zunahme der plattigen Konkretionen sprechen für einen nochmals ansteigenden Wasserspiegel vor dem folgenden (römerzeitlichen) längeren Tiefstand. Diese Probe datiert auf 2350-2150 BP cal (26).

Da es nur 3 cm Sediment und keine Indizien für einen langsam fallenden Seespiegel im Hangenden

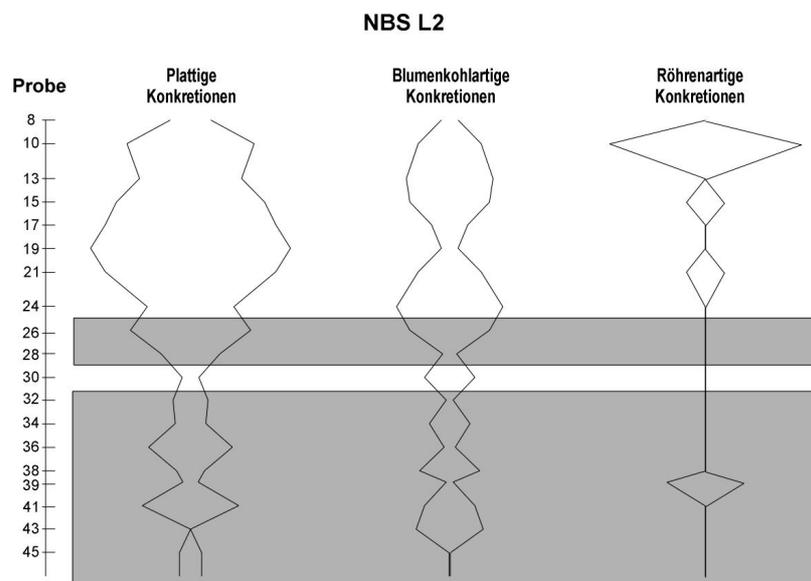


Abbildung 13: Verteilung der Kalkkonkretionen in Kern NBS L2 0,2-0,63 mm. Je breiter die Kurve ist, desto größer ist der Anteil des jeweiligen Konkrektionstyps. Die grauen Bereiche sind statistisch nicht signifikant.

dieser Probe gibt, muß hier ein Hiatus durch Erosion oder ein extrem rasch sinkender Wasserspiegel vermutet werden.

Neben den Kalkkonkretionen werden organische Reste und Schill im ufernahem Bereich angereichert (MAGNY 1992 a). In den hier untersuchten Kernen kann keine Gleichläufigkeit dieser beiden Parameter festgestellt werden.

Betrachtet man den Anteil organischer Partikel, so nehmen diese in Kern L2 nach oben und unten (Torfstraten), also zu ufernahem bzw. landfesten Abschnitten des Bohrkernes, hin zu. Eine Zu- oder Abnahme der organischen Partikel, die mit der Verteilung der Konkretionen korreliert, ist jedoch nicht vorhanden. In Kern Gn5 sind mehrere Bereiche mit stärkerer organischer Anreicherung von solchen mit geringem organischem Anteil zu unterscheiden. In Kern Gn7 kann diese Differenzierung nicht gemacht werden. Das stellt die Anwendbarkeit der Theorie von MAGNY 1992 a für den Gnadensee in Frage.

Zusammenfassend läßt sich Folgendes sagen:

In allen Kernen treten als Hauptbestandteile organische Partikel, verschiedene Kalkkonkretionen und Schill auf. Untergeordnet kommen Mineralkörner, Holzkohlen, Oogonien (verkalkt und nicht verkalkt) und Operculi vor. In den Kernen Gn5 und Gn7 aus dem Gnadensee überwiegt der Schillanteil (Ausnahme: drei Proben mit vorwiegend eckigen Konkretionen). Bei den Kernen L2 und W4 aus dem Nussbaumer See dominiert der Anteil an organischen Partikeln (Ausnahme: bei zwei Proben aus L2 überwiegen die plattigen Konkretionen, bei zwei weiteren, dem glazialen Untergrund nahen Proben die Mineralkörner). Dieser Unterschied bei den Hauptbestandteilen des Sedimentes der beiden Seen läßt sich durch die Seegröße bzw. die jeweilige Ausdehnung der Uferbank erklären: Am Bodensee ist die Probenahmelokalität ca. 200 m vom Ufer entfernt, am Nussbaumer See dürfte das Ufer zur Zeit der Sedimentablagerung maximal 25 Meter von der Probenahmelokalität entfernt gewesen sein. Durch die Ufervegetation konnten am Nussbaumer See größere Mengen organischer Partikeln an den Ort der Probenahme gelangen. Zudem wird in großen Seen die organische Substanz eher resuspendiert und dabei abgebaut als in kleinen Seen (MEYERS & ISHIWATARI 1995); dieser Mechanismus verstärkt den Unterschied zwischen Gnadensee und Nussbaumer See bezüglich der Menge organischer Partikeln.

Für eine anthropogene Beeinflussung der Sedimente (Seekreiden, Kalkmudden und Torfe) sind keine Hinweise vorhanden. Terrigener Eintrag wird in Einzelproben durch eine erhöhte Menge von Mineralkörnern belegt.

Eine Rekonstruktion des Seespiegels mittels Kalkkonkretionen läßt sich in Kern L2 durchführen. Die Kerne Gn5, Gn7 und W4 sind dafür ungeeignet.

In L2 indizieren die Konkretionen zunächst (von alt nach jung) den wegen des Sedimentwechsels von Torf zu Seekreide zu erwartenden Wasserspiegelanstieg, danach den Rückgang des Pegels, der kurz vor dem jüngsten Ende der Sedimentsäule von einem erneuten Seespiegelanstieg abgelöst wird. Die Seekreideschicht ist an ihrem jüngsten Ende, möglicherweise durch den genannten Seespiegelanstieg erosiv verkürzt.

2.4 Röntgendiffraktometrie

Die Röntgendiffraktometrie erlaubt halbquantitative Aussagen zur Mineralzusammensetzung der Sedimente. Auf diese Weise können terrestrische Sedimentkomponenten (Quarz, Dolomit, Silikate) in den autochthonen Seesedimenten (Calcit, Aragonit) oder Veränderungen des Mineralbestandes der Sedimente im Laufe der Zeit (z.B. durch wechselnde Liefergebiete) nachwiesen werden. Einschränkend muß angemerkt werden, dass Komponenten geringer Konzentration durch die überwiegend auftretenden Mineralphasen überdeckt werden können (abhängig vom Verhältnis der Phasen zueinander, sowie deren Art und Kristallisation).

Es folgen Ergebnisse, die für alle untersuchten Proben gelten.

In allen Röntgendiffraktogrammen ist ein Signalband ("Berg") zu Beginn des Diffraktogrammes zu erkennen (Abbildung 14). In den Diagrammen des Kerns NBS L2 reicht dieses Band von ca. 10° - 19° 2θ . In allen anderen Kernen (NBS W4, Gn4-7) erstreckt sich die Signalerhöhung von ca. 8° - 15° 2θ .

Ebenfalls bei allen Proben trat ein Peak bei $63,22^{\circ}$ 2θ auf (Abbildung 14). Dieser konnte keiner Mineralphase zugeordnet werden.

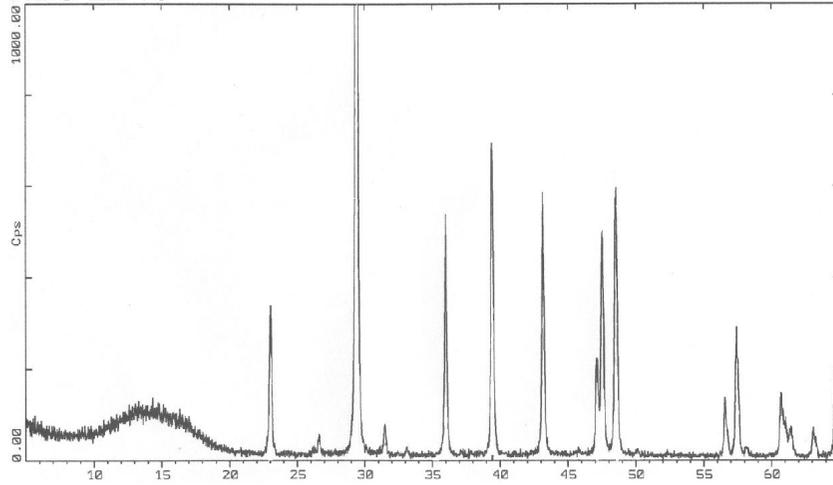
In den folgenden Abschnitten werden zunächst die jeweils auftretenden Mineralphasen genannt. Anschließend wird auf die Charakteristika einzelner Kerne und bestimmter Proben eingegangen.

2.4.1 Nussbaumer See

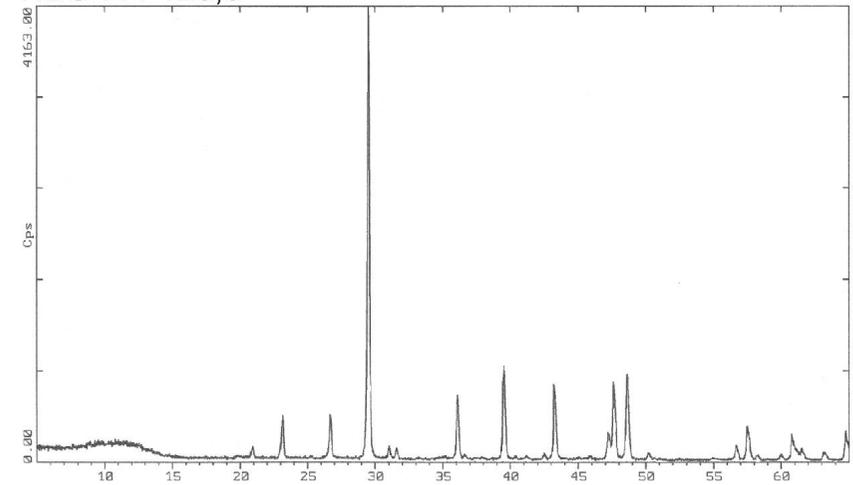
Die wichtigsten Mineralphasen in den Kernen NBS L2 und NBS W4 sind: Calcit, Quarz, Dolomit und Aragonit. Dolomit und Aragonit wurden nicht in allen Proben nachgewiesen.

Bevor auf die Proben des Zeitfensters näher eingegangen wird, sollen die Proben des Kerns NBS L2 außerhalb des Zeitfensters, d.h. älter als 2900 BP, kurz betrachtet werden: In der Probe 116 tritt neben Quarz nur ein Tonmineral (Illit?) auf und in den Proben 320, 344 und 399 kommen neben Quarz, Calcit (beide mit einem ähnlichen Anteil) und Dolomit verschiedene Tonminerale (Illit?, Chlorit?) vor. Die Probe 116 stammt aus einem Torfpaket. Die darin gefundenen Minerale

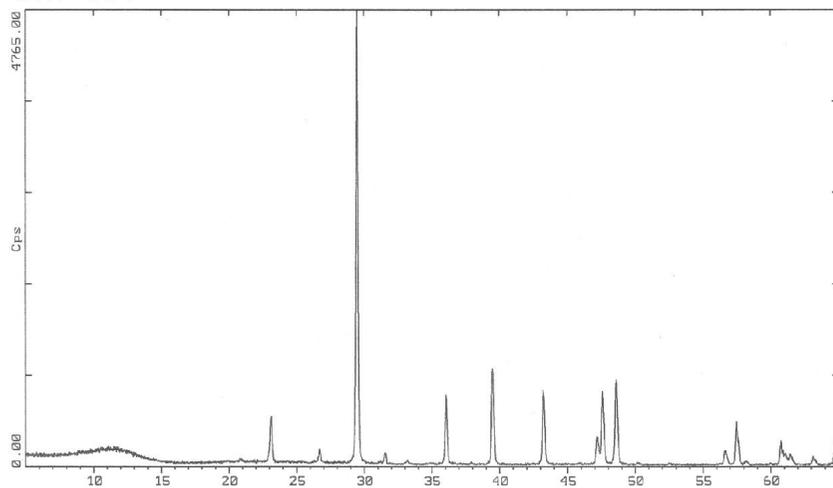
NBS L2 13



NBS W4 126,5



Gn7 451



Gn7 579 (Tonminerale)

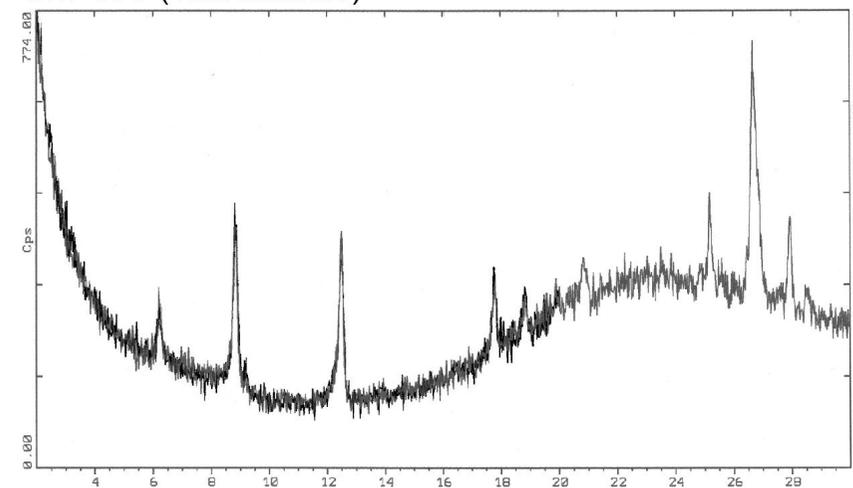


Abbildung 14: Typische Diffraktogramme von Proben aus dem Nussbaumer und dem Gnadensee. Aufgetragen ist die Intensität gegen den Winkel 2θ . Probe Gn7 579 ist auf Tonminerale hin analysiert worden; in schwarz das Diffraktogramm der glycolisierten Probe (bis $20^\circ 2\theta$).

dürften in erster Linie aus atmosphärischer Deposition und dem Eintrag der umliegenden Hänge stammen. Die Proben 320, 344 und 399 sind dem Beckenton sehr nahe bzw. stammen direkt daraus. Der Mineralbestand dieser drei Proben entspricht dem des Beckentons (s. SCHREINER 1992 a, b) bzw. einer Mischung aus Seekreide und Beckenton.

Es folgt die Betrachtung der Verteilung der Minerale in NBS L2 und W4 im Bereich des Zeitfensters (ca. 2950 - 2000 BP cal, Abbildung 15 & 16).

In Kern NBS L2 können im untersuchten Zeitbereich zwei unterschiedliche Zonen ausgegliedert werden (Abbildung 15): Der Kernabschnitt 6-28 cm enthält im Vergleich zum Bereich zwischen 28-45 cm mehr Aragonit. Die höchsten Quarzkonzentrationen im Bereich zwischen 26 und 32 cm kennzeichnen den Übergangsbereich zwischen beiden Zonen. Geringere, aber immer noch leicht erhöhte Quarzanteile kommen in den zum Liegenden hin folgenden Proben 34, 36 und 38 sowie in den Proben 43 und 45 vor.

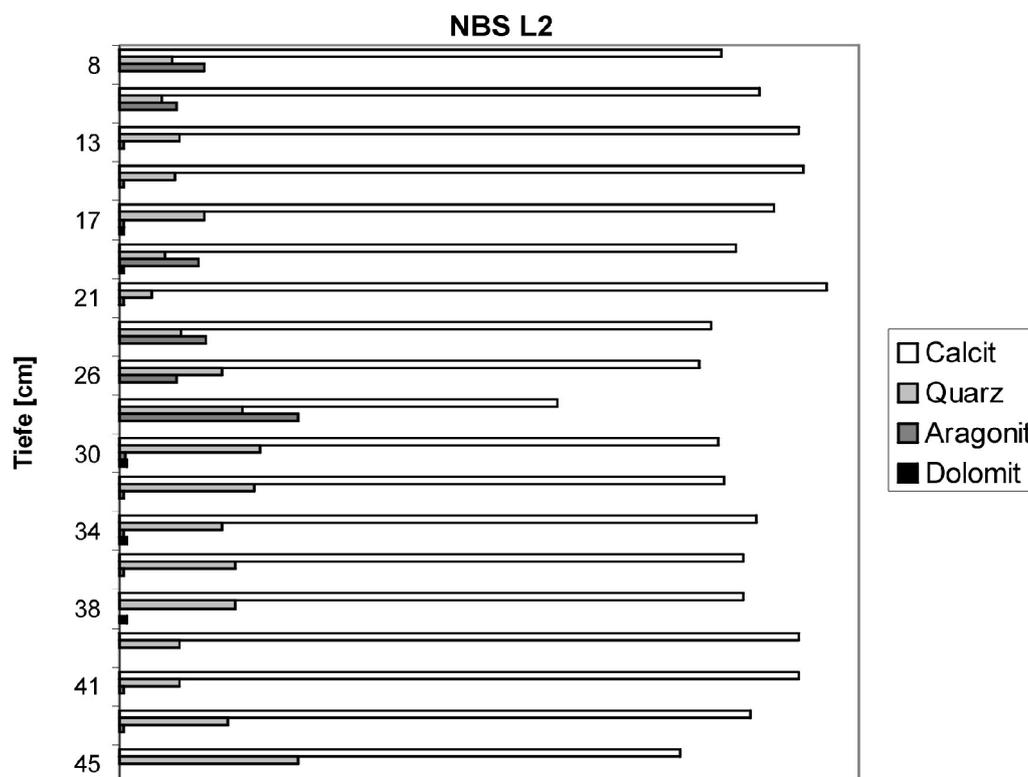


Abbildung 15: Mengenverhältnis der Mineralphasen in Bohrkern NBS L2. Da es sich um eine Abschätzung handelt, wurde auf die Größeneinteilung der X-Achse verzichtet.

Dolomit kommt in Kern NBS L2 in neun von neunzehn Proben vor, eindeutig nachweisbare Konzentrationen liegen im Kernabschnitt 30-34 cm.

In Bohrkern NBS W4 tritt Dolomit in allen Proben in nennenswerten Konzentrationen auf, Aragonit hingegen ist nicht nachweisbar (Abbildung 16). Die Konzentrationsänderungen von Calcit, Quarz und Dolomit über den Kernverlauf zeigen keine deutlichen Trends.

Besteht, wie im vorliegenden Fall, das Phasensystem aus nur einer Haupt- und zwei Nebenkomponenten und korrelieren die Nebenkomponenten miteinander positiv (und wegen des geschlossenen Datensatzes negativ mit der Hauptkomponente), dann treten Konzentrationsänderungen einer Komponente stärker hervor, wenn man den Quotienten aus einer Haupt- und einer Nebenkomponente bildet. Deshalb wurden hier die Quotienten Dolomit/Calcit und Quarz/Calcit gebildet (Dolomit und Quarz = Neben-, Calcit = Hauptkomponente).

Der Quotient Dolomit/Calcit zeigt ähnlich wie Quarz bzw. Quarz/Calcit den allochthonen Einfluß

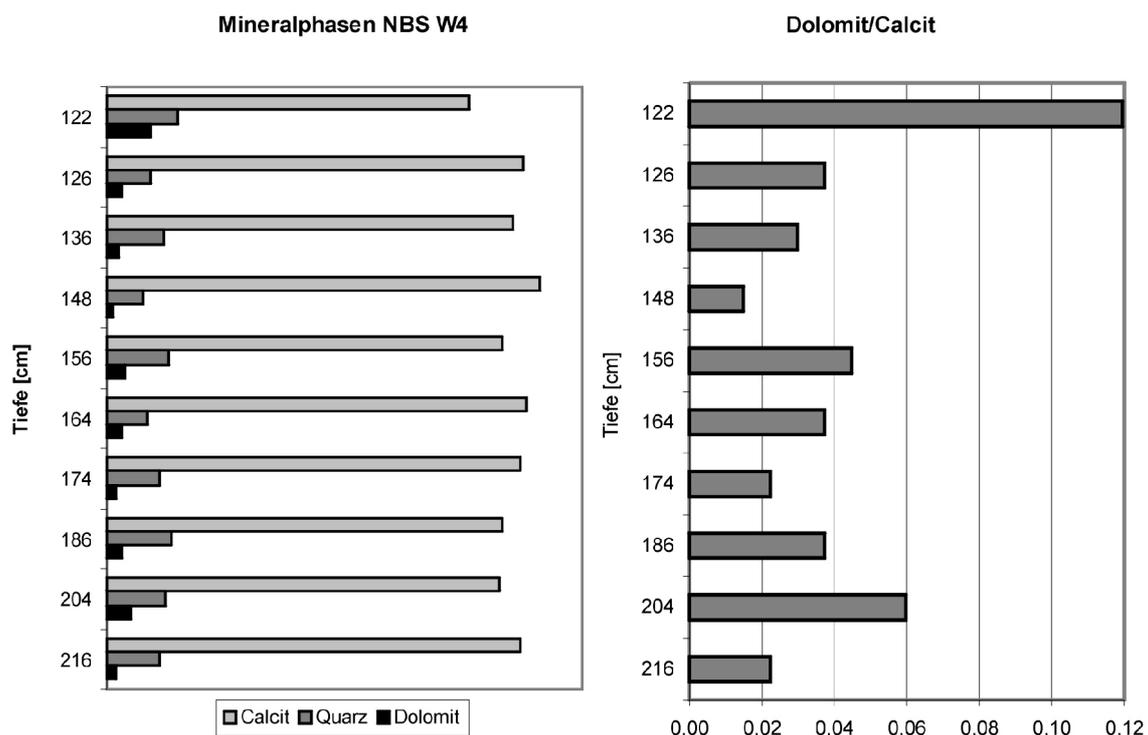


Abbildung 16: Mengenverhältnis der Mineralphasen und das Verhältnis Dolomit zu Calcit in Bohrkern NBS W4. Da es sich um eine Abschätzung der Mineralphasen handelt, wurde auf die Größeneinteilung der X-Achse verzichtet.

von mineralischem Detritus auf das Sediment.

Betrachtet man das Dolomit/Calcit-Verhältnis in NBS W4 (Abbildung 16), so sind die drei Proben 122, 156, 204 mit einem erhöhten Quotienten von den Proben dazwischen zu unterscheiden.

Interessant ist dabei, dass Quarz und Dolomit nicht die gleichen Maxima aufweisen (Abbildung 16): die Proben 136 und 186 zeigen hohe Werte für Quarz, die Probe 204 einen hohen Dolomitgehalt. Hohe Gehalte dieser beiden NebenkompONENTEN finden sich in den Proben 122 und 156. Der erhöhte Quarzgehalt ohne parallele Erhöhung des Dolomitgehaltes in Probe 136 kann nicht erklärt werden. Die Proben 186 (erhöhter Quarzgehalt) und 204 (erhöhter Dolomitgehalt) stammen aus der makroskopisch gleichen Schicht, die gegenüber den angrenzenden Bereichen etwas dunkler ist. Probe 186 repräsentiert den Übergangsbereich zum Hangenden, Probe 204 entstammt dem zentralen Schichtbereich. Möglicherweise schwanken Quarz- und Dolomitgehalte dieser Schicht, aus der die beiden Proben stammen, um einen gegenüber den angrenzenden Bereichen erhöhten Mittelwert, unterscheiden sich aber von Probe zu Probe.

Eine eindeutige Korrelation zwischen den drei Komponenten Quarz, Aragonit und Dolomit ist weder in NBS L2 noch in NBS W4 zu erkennen. Quarz und Dolomit in NBS W4 haben eine Sonderstellung, da sie mit $R^2=0,4$ (Bestimmtheitsmaß der linearen Regression, je näher der Wert an 1 liegt, desto besser deckt sich die berechnete Gerade mit den Messpunkten) eine leicht positive Korrelation zeigen.

In Kern NBS L2 ist der Quarzgehalt mit Ausnahme der Probe 17 in dunkleren Kernbereichen höher als in helleren Kernabschnitten. Kein Zusammenhang zwischen Sedimentfarbe und Quarzgehalt besteht in Kern NBS W4, lediglich Probe 204 liegt in einem gegenüber den angrenzenden Bereichen dunkleren Kernabschnitt.

Die Tonmineralzusammensetzung wurde exemplarisch für den Nussbaumer See an den Proben 13 (Seekreide) und 28 (Kalkmudde) des Kern NBS L2 untersucht, um mögliche Unterschiede der beiden Sedimenttypen zu erfassen. Beide Proben weisen die selbe Tonmineralogie auf: Illit und Chlorit oder Montmorillonit. Da von diesen beiden Proben keine Ethylenglycolpräparate hergestellt wurden, kann zwischen Chlorit und Montmorillonit nicht unterschieden werden.

2.4.2 Bodensee-Gnadensee

Die mineralogische Zusammensetzung der Sedimente des Gnadensees ist homogen (Abbildung 17): Calcit dominiert alle Proben, daneben tritt Quarz auf. Aragonit kommt in allen Proben (Ausnahme: Gn6 376 ohne Aragonit) in sehr geringen Konzentrationen vor, d.h. eine eindeutige Identifikation ist nicht immer möglich. Hinweise auf Dolomit liefert dessen schwach ausgebildeter 001-Reflex in einigen Proben des Kerns Gn7 (Abbildung 14).

In Kern Gn4 fällt die Probe 507,5 durch ihren vergleichsweise geringen Quarzgehalt auf (Abbildung 17). Die Schicht aus der die Probe stammt (s. Abbildung 29) besteht aus heller d.h. reiner Seekreide; die sie umgebenden Schichten sind wesentlich dunkler.

Probe Gn4 513,5 kommt aus einer dunklen Schicht (die Färbung wird durch einen erhöhten Gehalt an organischer Substanz hervorgerufen) und weist gegenüber den anderen Proben des Kerns einen erhöhten Quarzgehalt auf. Der leicht erhöhte Anteil an Aragonit in Probe Gn4 580 wird durch die optisch sichtbaren Mollusken (Aragonitbildner) in dieser Probe erklärt.

Calcit- und Aragonitanteil in den Proben des Kerns Gn5 zeigen eine geringe Schwankungsbreite (Abbildung 17). Der Quarzgehalt ist in den optisch hellen Kernabschnitten von Gn5 (501,5; 544; 560,5; 576,5) gering, in den optisch dunklen Bereichen (497,5; 519,5; 548; 564; 582) höher (s. a. Abbildung 31). Dabei sind sowohl die Farb- als auch die Konzentrationsunterschiede des Quarzgehaltes im Kernbereich zwischen 560,5 und 620,5 cm Tiefe nur schwach ausgeprägt.

Für die drei untersuchten Proben des Kerns Gn6 gilt das für die vorgenannten Kerne bereits gesagte: Die Schichten, aus denen die Proben stammen, werden mit zunehmender Tiefe dunkler, dabei nimmt der Quarzanteil mit dem Dunklerwerden des Sediments zu, der Calcitanteil ab (Abbildung 17). Aragonit konnte in der obersten Probe (376) nicht nachgewiesen werden. Es ist davon auszugehen, dass in dieser Schicht Molluskenreste (auch makroskopisch nicht zu erkennen) keinen relevanten Sedimentanteil bilden.

Gn7 läßt geringe Variationen der Zusammensetzung der Mineralphasen erkennen (Abbildung 17). Der Quarzgehalt ist in Probe 465 am höchsten, der Calcitanteil am niedrigsten. Aragonit

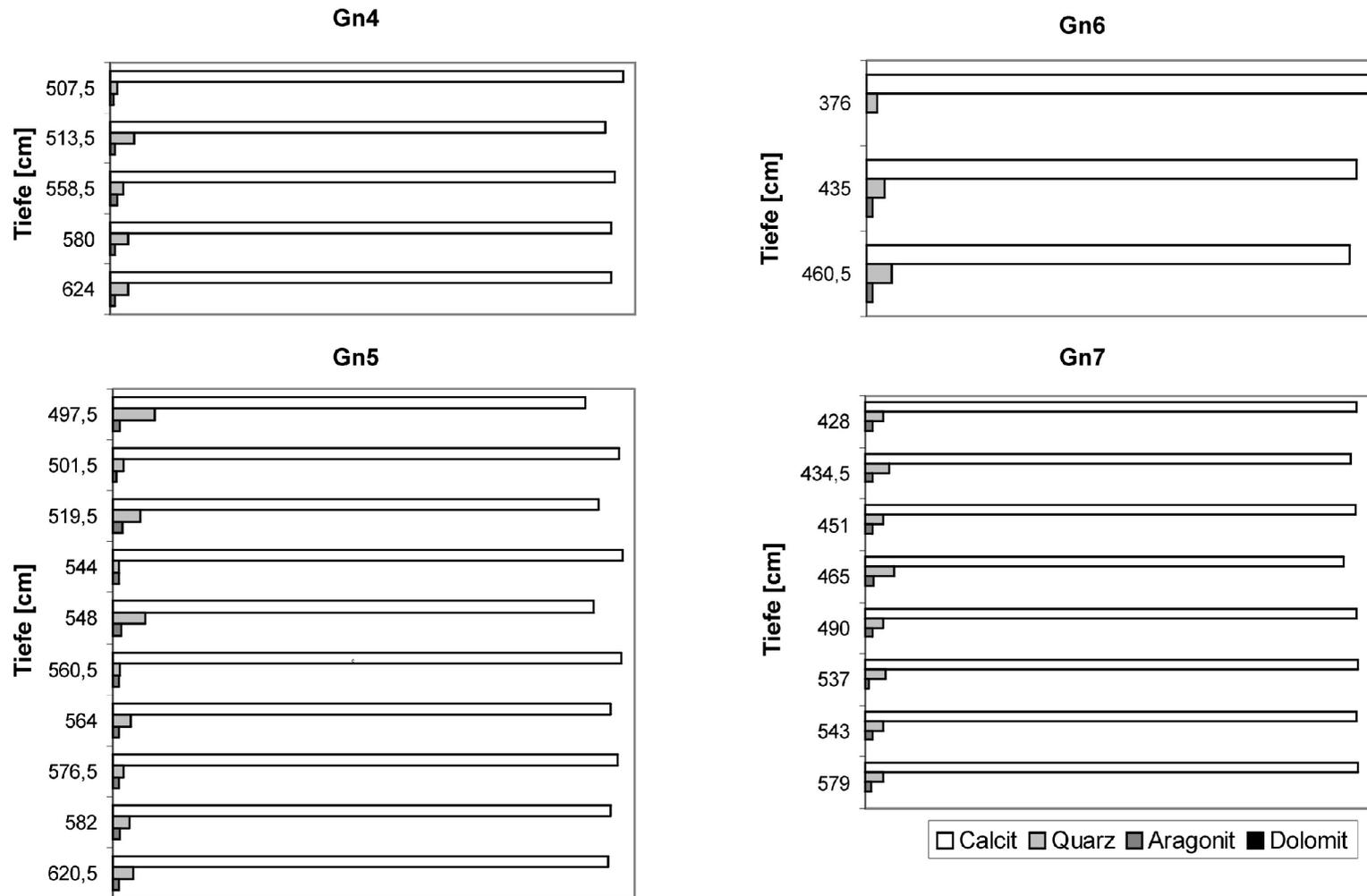


Abbildung 17: Mengenverhältnis der Mineralphasen in Bohrkern Gn4-7. Da es sich um eine Abschätzung anhand der Röntgendiffraktogramme handelt, wurde auf die Größeneinteilung der X-Achse verzichtet.

weist die geringste Konzentration in Probe 537 auf. Dolomit ist möglicherweise in den Proben 434,5; 451,5 und 465 vorhanden. In Kern Gn7 ist kein Zusammenhang zwischen hellerem bzw. dunklerem Sediment und dem Quarzanteil des Sediments zu erkennen. Am deutlichsten ist dies an den Proben 428 - helle Sedimentschicht - und 579 - dunkle Sedimentschicht - zu sehen: beide haben eine vergleichbare Mineralzusammensetzung.

Als Beispiele für die Tonmineralogie der subrezentenen Sedimente des Gnadensees wurden folgende Proben ausgewählt: Gn5 517,5 und Gn5 582 sowie Gn7 464 und Gn7 578. Durch diese Probenauswahl werden beide Lokalitäten im Bodensee-Gnadensee sowie karbonatärmere und karbonatreichere Schichten erfasst.

Alle aus dem Gnadensee untersuchten Proben enthalten die selben Tonminerale: Chlorit (schwach ausgeprägter Basisreflex bei $6,2^\circ 2\theta$, ausgenommen Gn7 578 mit deutlich ausgeprägtem Reflex) und Illit. Illit erzeugt in allen Proben vergleichbar starke Reflexe. Es gibt keine Hinweise auf quellfähige Tonminerale.

2.4.3 Diskussion und Zusammenfassung

Zunächst werden hier auffallende Merkmale der Diffraktogramme besprochen. Anschließend werden die Mineralgehalte der einzelnen Kerne diskutiert und verglichen und dann auf ihre landschaftsgeschichtlichen Aussagen hin interpretiert.

In allen hier untersuchten Proben tritt ein Signalband zwischen 10° und 19° bzw. 8° und $15^\circ 2\theta$ auf. Nach MANN 1979 ist eine breites Signalband zwischen 15° und $32^\circ 2\theta$ typisch für Opal-A. In den hier untersuchten Proben konnten Diatomeen als Opalbildner sowohl im Schmierpräparat (drei Tropfen der entkalkten Suspension der Probe auf einen Objektträger, anschließend mit einem Deckglas abgedeckt) unter dem Durchlichtmikroskop als auch mit dem REM nachgewiesen werden. In allen untersuchten Proben treten sowohl stengelige wie auch zentrale Arten auf, wobei die stengeligen überwiegen. In Abbildung 18 sind einige Beispiele von Diatomeen zu sehen. Einen eindeutigen Beweis für einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Diatomeen und dem breiten Signalband zwischen 10° und 19° bzw. 8° und $15^\circ 2\theta$ in den hier

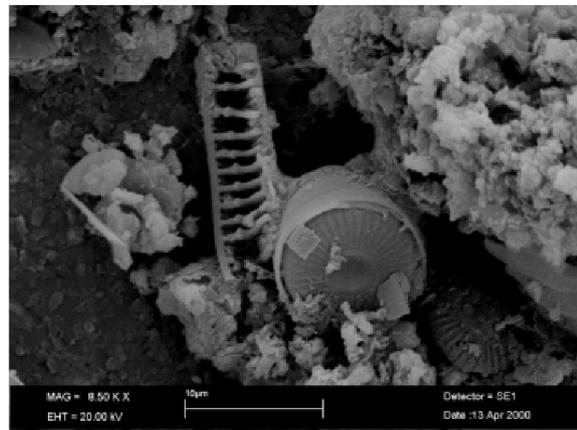
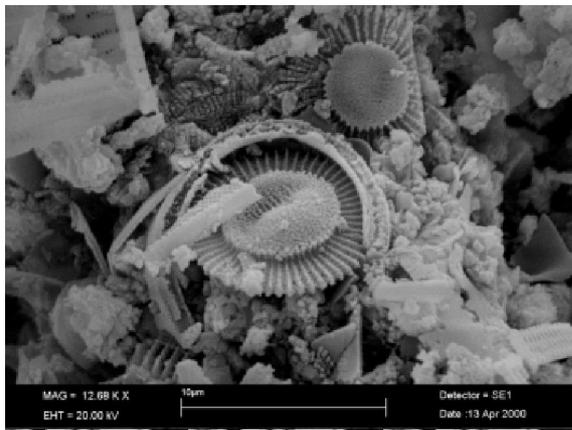


Abbildung 18: Beispiele verschiedener Diatomeen aus dem Gnadensee. Oben: Gn5 532-534 cm; unten: Gn7 531-533 cm. Maßstab oben 10 µm, unten 20µm.

vorliegenden Diffraktogrammen gibt es nicht.

Unklar bleibt auch die unterschiedliche Breite bzw. leicht verschobene Lage des (potentiellen) Opalpeaks in den Diffraktogrammen des Kerns NBS L2 im Vergleich zu den anderen Kernen. Ein Erklärungsansatz wäre der unterschiedliche Kristallisationsgrad des Opals.

Der Kern NBS L2 stammt als einziger der hier genannten Kerne aus dem heute landfesten Bereich. Möglicherweise hat der Kontakt mit der Bodenluft zu einer Veränderung der Ordnung des "Kristallgitters" geführt. Im Vergleich zu den Kernen NBS W4 und Gn4-7 unterschiedliche Diatomeengehalte oder andere Arten als im Kern NBS L2 sind ein weiterer Erklärungsansatz. Zusätzliche Untersuchungen dieses Phänomens wären wünschenswert.

Bei den Reflexen des Aragonit ist auffällig, dass der 002-Reflex ($33,3^\circ 2\theta$) oftmals stärker oder genauso stark ausgeprägt ist wie der 001-Reflex. Möglicherweise "versteckt" sich in dem 002-Reflex des Aragonit noch der Basisreflex eines Eisen(hydr)oxid, der in diesem 2θ -Bereich liegt.

Wegen der geringen Konzentrationen dieser Eisenhydroxide werden keine weiteren Reflexe sichtbar; ein eindeutiger Nachweis ist deshalb nicht gegeben. Eine andere Erklärung des starken 002-Reflexes des Aragonit wären Veränderungen der Kristallstruktur dieses metastabilen Minerals. Da die Umwandlung des Aragonits zu Calcit sehr langsam und durch Lösung und Rekristallisation vor sich geht (FÜCHTBAUER 1977), ist diese Erklärung für den erhöhten 002-Reflex weniger wahrscheinlich als die zuerst genannte.

Der Bohrkern NBS L2 unterscheidet sich von NBS W4 durch das Auftreten von Aragonit bei fast völligem Fehlen von Dolomit in NBS L2 im Gegensatz zu dem Fehlen von Aragonit beim Auftreten von Dolomit in Bohrkern NBS W4.

Der unterschiedliche Aragonitgehalt beider Kerne kann durch die Fazies erklärt werden: Im flachen Wasser, in dem die Sedimente des Kerns NBS L2 zur Ablagerung kamen, wurde eine große Anzahl an Mollusken bzw. Schill, der den Aragonit liefert, sedimentiert. Mollusken bevorzugen eine geringe Wassertiefe. Bohrkern NBS W4 aber stammt aus einer Wassertiefe von heute 5,25 m. In dieser Tiefe lebten und gelangten nur wenige Mollusken zur Ablagerung. Dies führt zu dem Fehlen von Aragonit in den Proben aus Kern W4.

Zum Auftreten von Dolomit in Kern NBS W4: Dolomit ist im Gegensatz zu Aragonit ein allochthoner Sedimentbestandteil. Der Nussbaumer See hat zwar einen Zufluss, der allochthonen Eintrag bedingen könnte, allerdings mündet dieser in das Ostbecken nahe dem Ausfluß des Sees (die Bohrkern stammen aus dem mittleren Becken, Abbildung 2). Der Zufluss spielt damit in dieser Frage eine geringe Rolle. Allochthone Komponenten müßten folglich durch ständige direkte Erosion im Uferbereich und/oder durch atmosphärischen Eintrag in den See gelangen. Diese beiden Quellen für allochthonen Dolomiteintrag würden dann in beiden Bohrkernen zu ähnlichen Dolomiteinträgen führen. Die geringere Konzentration in NBS L2 spricht gegen diese Erklärung. Ebenso scheidet eine stärkere „Verdünnung“ des Dolomitgehalts in Kern NBS L2 gegenüber NBS W4 durch autochthone Sedimentbildung (Calcit) aus, da NBS W4 die höhere mittlere Sedimentakkumulationsrate aufweist. In dem Fall wäre die stärkere Verdünnung des allochthonen Dolomits für NBS W4 zu erwarten, was nicht zutrifft.

Am wahrscheinlichsten erscheint eine Dedolomitisierung der Sedimente in Kern NBS L2 durch Oberflächenwasser (FÜCHTBAUER 1977): diese wirken nur auf die obersten Sedimente des Kerns NBS L2 ein, nicht aber auf NBS W4.

Der wechselnden terrestrischen Anteil im Gesamtsediment kann durch einen Vergleich der Komponenten Quarz und Dolomit (allochthon) mit den Komponenten Calcit und Aragonit (autochthon, der allochthone Calcitanteil kann dabei vernachlässigt werden) erfasst werden. In Abbildung 19 ist der jeweilige Quotient $(\text{Quarz} + \text{Dolomit}) / (\text{Calcit} + \text{Aragonit})$ für die Kerne NBS L2 und W4 gegen die Tiefe aufgetragen. Je größer der Wert, desto höher ist der terrestrische Anteil im Sediment. Die umrandeten Bereiche bezeichnen die Sedimentabschnitte, in denen ein erhöhter terrestrischer Input vorhanden ist. In Kern NBS W4 ist kein Aragonit vorhanden.

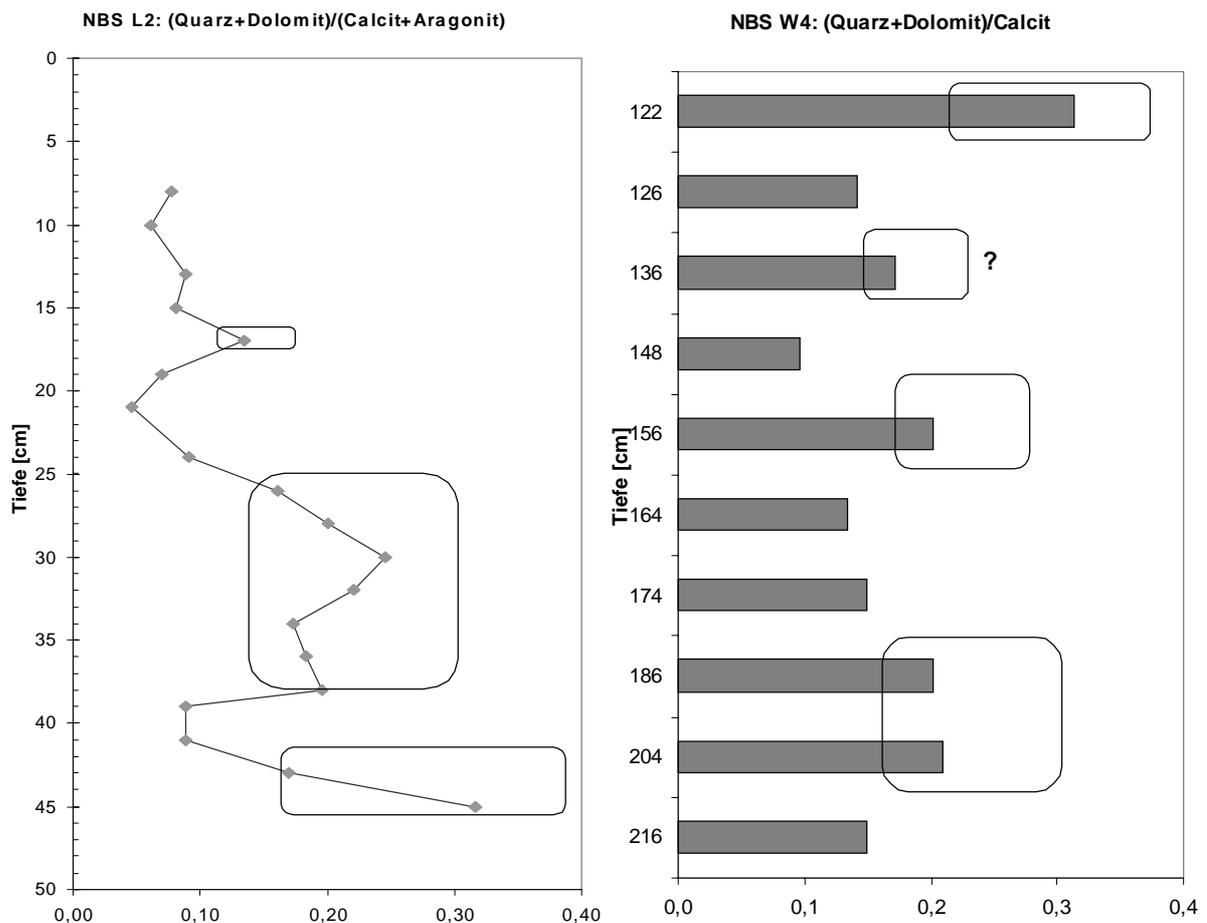


Abbildung 19: Verhältnis der allochthonen zu den autochthonen Mineralphasen in den Bohrkernen NBS L2 und W4. Aragonit tritt in NBS W4 nicht auf.

Der stärkste terrestrische Eintrag ist in Kern L2 im Bereich 41-45 cm (Abbildung 19 grau unterlegte Bereiche, Punkte markieren die Probenunterkante) am Übergang vom Torf zur Kalkmudde zu beobachten, also im Zuge einer Transgression des Sees.

In Kern W4 ist in Probe 122 der höchste terrestrische Eintrag vorhanden. Wegen der Relevanz für die Gesamtbedeutung der Ergebnisse wird auf die Datierung der Eintragsphasen und die Korrelation mit anderen Anzeigern terrestrischen Einflusses in der abschließenden Diskussion (Kap. 3.1.2) eingegangen.

Die Probenauswahl aus den Kernen des Gnadensees ermöglicht den Vergleich optisch unterschiedlicher Schichten und den Vergleich zwischen den beiden Enden des Gnadensees (Gn5 NW-Ende und Gn7 SE-Ende, Abbildung 3).

Für den Markelfinger Winkel (NW-Ende des Gnadensees) besteht eine Korrelation zwischen Sedimentfarbe und Quarzgehalt: Je dunkler eine Sedimentschicht erscheint, desto höher ist ihr Quarzgehalt. Der Calcit der Seekreide ist autochthon gebildet; Quarz ist ein allochthoner Sedimentbestandteil (in den Gnadenseesedimenten wurde weder Dolomit noch Aragonit in zu berücksichtigenden Konzentrationen gefunden, sodass hier der terrestrische Einfluss direkt über den Quarzanteil bestimmt wurde). Helle Schichten mit hohem Calcit- und vergleichsweise niedrigem Quarzgehalt sind fast ausschließlich autochthonen Ursprungs.

Ein geringer allochthoner Einfluß auf den Markelfinger Winkel kann also für den Ablagerungszeitraum heller Schichten angenommen werden. Für die Sedimentationszeiträume der dunkleren Schichten ist von einem größeren allochthonen Einfluß auszugehen.

Die fehlende Korrelation zwischen Sedimentfarbe und Quarzgehalt in Kern Gn7 ist auf die undeutliche Lamination des Bohrkerns zurückzuführen: sie ergibt sich durch den Wechsel von hellen und dunklen Schichten im Millimeterbereich. Hellere Kernbereiche entstehen hier durch eine größere Mächtigkeit der hellen Laminae bzw. durch geringere Mächtigkeit der dunkleren Laminae. Für dunklere Kernbereiche gilt Entsprechendes. Somit sind die helleren/dunkleren Bereiche in Kern Gn7 nicht direkt mit den hellen/dunklen Schichten der Kerne Gn4-6 aus dem Markelfinger Winkel vergleichbar. In den untersuchten Proben des Kerns Gn7 sind immer einige helle und dunkle Schichten zusammengefasst, sodass die charakteristische Zusammensetzung einer einzelnen Schicht nicht zum Ausdruck kommen kann.

Im Folgenden wird die Tonmineralzusammensetzung der Sedimente beider Seen diskutiert.

Die Proben aus dem Nussbaumer See wurden nicht mit Glycol behandelt, jedoch kann man analog zu den glycolisierten Proben aus dem Gnadensee davon ausgehen, dass es sich auch in den Proben aus dem Nussbaumer See um Chlorit handelt, da beide Seen den geologisch gleichen Untergrund aufweisen.

Kaolinit kann anhand seines basalen Reflexes nicht eindeutig identifiziert werden, da sich dieser mit dem 002-Reflex des Chlorits überlagert. MÜLLER & QUAKERNAAT (1969) fanden in den rezenten Bodenseesedimenten in der Fraktion $<2 \mu\text{m}$ keinen Kaolinit, SCHÄFER 1972 und NEUKIRCH 1993 hingegen konnten Kaolinit in den gröberen Fraktionen nachweisen. Daher kann auch in den hier untersuchten Sedimente des Gnadensees Kaolinit vermutet werden. Wegen des gleichen geologischen Untergrundes von Bodensee und Nussbaumer See ist auch in den Sedimenten des Nussbaumer Sees Kaolinit anzunehmen.

Die Tonmineralzusammensetzung der Gnadenseesedimente aus dem Zeitfenster erlaubt den Vergleich (ausgenommen Kaolinit) mit der rezenten Zusammensetzung. MÜLLER & QUAKERNAAT (1969) fanden in den rezenten Gnadenseesedimenten Glimmer, Smectit und Chlorit. Dabei kommt Smectit nur in sehr geringen Anteilen vor. MÜLLER & QUAKERNAAT (1969) wendeten eine längere Einwirkzeit des Ethylenglycols an als in der hier vorgelegten Arbeit. In den hier untersuchten Proben ist Smectit möglicherweise unvollständig aufgequollen. Dieses unvollständige Aufquellen zusammen mit der geringen Konzentration des Minerals im Sediment kann den fehlenden Nachweis des Smectits in den hier untersuchten Proben erklären.

MÜLLER & QUAKERNAAT (1969) führen den Smectitgehalt der Bodenseesedimente auf die Molasse und den Hegauvulkanismus zurück. Der geringere Smectitanteil der rezenten Gnadenseesedimente ist durch den fehlenden Sediment austausch mit dem restlichen See und durch die Aufarbeitung des glazialen Untergrunds zu erklären (MÜLLER & QUAKERNAAT 1969).

In Kern Gn7 wurde kein Smectit nachgewiesen, d.h. es ist in Gn7 in jedem Fall nicht mehr Smectit als in den von MÜLLER & QUAKERNAAT (1969) untersuchten Gnadenseesedimente vorhanden. Daraus folgt, dass im untersuchten Zeitraum (1400-2080 BP cal) ebenfalls kein Sediment austausch mit dem restlichen See bestand. Dies bedeutet weiter, dass der Rhein auch vor Errichtung des künstlichen Damms, der die Insel Reichenau mit dem Land verbindet, keinen

nennenswerten Einfluß auf die Sedimentation im Gnadensee hatte. Dies wäre, zumindest für extreme Hochwässer, im Bereich des Bohrkerns Gn7 zu erwarten gewesen (s.a. Abbildung 3), da die Lokalität von Gn7 nur durch eine schmale Zone flachen Wassers vom Seerhein, der eine deutliche Strömung aufweist, getrennt ist.

Folgendes läßt sich zusammenfassen: Nussbaumer See und Bodensee haben eine ähnliche Mineralzusammensetzung. Im Sediment des Nussbaumer Sees kommt außer Calcit, Quarz und Aragonit noch Dolomit vor, insbesondere in Kern NBS W4.

An Tonmineralen wurde Illit und Chlorit nachgewiesen.

Erhöhter Eintrag von terrestrischem Material konnte anhand erhöhter Quarz- und Dolomitanteile des Sediments belegt werden (s.a. Kap. 3.1.2). In den Sedimenten des Markelfinger Winkels geht der erhöhte Quarzgehalt mit einer dunklen Sedimentfarbe einher.

2.5 Sedimentchemismus

Auch in diesem Kapitel werden den einzelnen Ergebnissen zunächst einige allgemeine und anschließend für beide Seen gültige Betrachtungen vorangestellt. Diese Hinweise dienen dazu, die chemischen Daten im Hinblick auf mögliche Interpretationen zu betrachten und die Zusammenfassung der Daten zu verstehen.

Die chemische Zusammensetzung der Sedimente gibt Auskunft über die Genese des untersuchten Materials: Karbonate (hier fast ausschließlich Calciumcarbonat) sind sowohl im Nussbaumer See als auch Untersee in erster Linie als autochthone Bildung zu sehen.

Silizium stammt, sofern es mit Aluminium, Natrium, Kalium und den Schwermetallen korreliert, aus allochthon eingebrachten Silikaten (s.a. folgender Abschnitt und ROBINSON et al. 1993). Aufgrund der mikroskopischen Untersuchungen und den Röntgendiffraktogrammen muß ein Teil des Siliziums von autochthonen Diatomeen stammen; chemisch kann zwischen beiden Quellen hier nicht unterschieden werden.

Stark erhöhte Kupfer- und/oder Zinn- und/oder Blei- und/oder Zinkwerte können auf frühe anthropogene „Umweltverschmutzung“ hinweisen (MATSCHULLAT et al. 1997). Da diese Metalle jedoch auch in natürlichen Silikaten vorkommen (s.o.), muß in jedem Einzelfall die Herkunft diskutiert werden (Kap. 2.5.1 L2, Kap. 2.5.2 Gn5).

Erhöhte Nährstoffgehalte (Phosphor und Stickstoff, u.U. Magnesium, Kalium und Natrium) im Sediment deuten auf eine anthropogene Gewässerbeeinflussung während der Sedimentablagerung hin.

Kommen wir zu den für beide Seen gültigen Beobachtungen:

Da die Verteilung der Elemente durch die Lithologie geprägt wird, ist die Betrachtung von Elementkonzentrationen nur im Zusammenhang mit der Lithostratigraphie sinnvoll.

Eine Betrachtung der einzelnen Elemente jeweils für sich ist nicht sinnvoll, da die Aussagen der einzelnen Elemente sich gegenseitig bestätigen oder ergänzen (Stichwort Lithologie). Es wurden daher typische Elemente stellvertretend für Elemente, die vergleichbare Konzentrationsänderungen im Kernverlauf zeigen, ausgewählt und in den folgenden Unterkapiteln dargestellt. Alle Analyseergebnisse können in Kapitel 6.2.4 und 6.2.5 nach Kernen sortiert im Anhang eingesehen

werden. Im Folgenden werden die Elementgruppen genauer betrachtet, unterstützt durch eine Korrelationsmatrix (Tabelle 6). Diese Matrix kann nur eine Ergänzung zum Vergleich der Konzentrationsänderungen mit der Kerntiefe sein, da aus geschlossenen Datensätzen induzierte Korrelationskoeffizienten entstehen (s. a. SWAN & SANDILANDS 1995).

	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O _{3t}	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Ba	V	C _{org}	
SiO ₂	1																			
CaO	-0,86	1																		
Fe ₂ O _{3t}	0,80	-0,78	1																	
Al ₂ O ₃	0,92	-0,93	0,87	1																
MgO	0,75	-0,82	0,87	0,92	1															
MnO	0,16	-0,48	0,53	0,46	0,68	1														
Na ₂ O	0,98	-0,86	0,87	0,96	0,82	0,26	1													
K ₂ O	0,92	-0,93	0,87	1,00	0,93	0,48	0,95	1												
P ₂ O ₅	0,80	-0,87	0,73	0,90	0,77	0,35	0,85	0,90	1											
TiO ₂	0,62	-0,78	0,96	0,95	0,39	0,45	0,83	0,92	0,25	1										
Ni	0,90	-0,95	0,86	0,98	0,90	0,48	0,93	0,98	0,90	0,79	1									
Cu	0,91	-0,88	0,81	0,93	0,83	0,32	0,93	0,93	0,88	0,61	0,95	1								
Zn	0,72	-0,88	0,78	0,87	0,87	0,56	0,76	0,87	0,87	0,90	0,90	0,82	1							
Rb	0,93	-0,93	0,85	1,00	0,93	0,45	0,96	1,00	0,91	0,92	0,98	0,93	0,86	1						
Sr	0,28	0,18	0,12	0,03	-0,07	-0,59	0,27	0,02	-0,06	-0,66	-0,02	0,20	-0,22	0,06	1					
Y	0,85	-0,82	0,93	0,90	0,89	0,55	0,90	0,90	0,83	0,63	0,89	0,84	0,87	0,89	0,05	1				
Ba	0,62	-0,74	0,77	0,80	0,94	0,87	0,69	0,81	0,60	0,85	0,78	0,84	0,84	0,86	-0,47	0,85	1			
V	0,91	-0,94	0,81	0,99	0,95	0,56	0,94	0,99	0,92	0,92	0,98	0,92	0,87	1,00	-0,08	0,89	0,94	1		
C _{org}	-0,48	0,29	-0,30	-0,32	-0,22	0,25	-0,45	-0,32	-0,26	0,36	-0,29	-0,32	-0,24	-0,33	-0,53	-0,36	-0,12	-0,33	1	

Tabelle 6: Elementkorrelationen (Pearsons product moment) aus allen Bohrkernen. Aufgenommen wurden nur Elemente, deren Gehalt in einer ausreichenden Anzahl von Proben über der Nachweisgrenze lagen.

Die Hauptbestandteile CaCO₃ (in Tabelle 6 dem CaO entsprechend) und die organische Substanz (in Tabelle 6 als C_{org} vertreten) sind Elemente, die jeweils einen eigenen Konzentrationsverlauf über die Kerntiefen aufweisen.

SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ sowie die Spurenelemente Cr, Ni, Ga, Rb, Y, Zr, Pb, Nb, Co und V zeigen alle sehr ähnliche Konzentrationsänderungen im Kernverlauf.

SiO₂ hat dabei eine Sonderstellung, da es in Einzelfällen nicht dem Konzentrationsverlauf der anderen Elemente folgt. Bei der Besprechung der einzelnen Kerne wird daher gesondert auf die SiO₂-Konzentrationen eingegangen.

Des Weiteren zeigen die oben als Nährstoffe angesprochenen Elemente Na₂O, K₂O und P₂O₅ einen zur zuerst genannten Gruppe ähnlichen, im Einzelfall jedoch von dieser Gruppe abweichende Konzentrationsänderungen über die Kernteufe. Auch hier wird im Einzelfall auf diese Besonderheiten eingegangen.

Als Stellvertreter der genannten Gruppen werden im Folgenden SiO₂, Al₂O₃, Ni, V, K₂O und P₂O₅ besprochen.

Aus der Kombination der im letzten Absatz genannten Elemente lassen sich erste Schlüsse ziehen, die bei der weiteren Betrachtung der Ergebnisse anzuwenden sind:

In der Regel stammen diese Elemente aus Silikaten (s.a. ROBINSON et al. 1993)

Die als Nährstoffe bezeichneten Elemente sind in der Regel ebenfalls in Silikaten eingebaut, im Ausnahmefall bzw. untergeordnet in der organischen Substanz

in manchen Proben stammt das SiO₂ außer aus Silikaten noch aus einer anderen Quelle; eine solche könnten die Diatomeen darstellen (s.a. Kap. 2.4.3)

Fe₂O₃ und MnO weisen zwar in den Kernen ähnliche, aber doch signifikant abweichende Konzentrationen auf. Diese Ähnlichkeiten und Unterschiede können aus dem Redoxverhalten der beiden Elemente resultieren: Diese ist generell sehr ähnlich, Unterschiede zeigen sich in der langsameren Oxidationsrate von Mn²⁺ gegenüber Fe²⁺ und in der möglichen Beteiligung von Fe am S-Kreislauf (MASON & MOORE 1985, EUSTERHUES 2000). Wegen diesem unterschiedlichen Verhalten werden beide Parameter dargestellt.

MgO weist eine eigenständige Konzentrationskurve über die Kerntiefe auf.

Der Verlauf der Sr-Konzentrationen in den Kernen ähnelt meist dem der CaCO₃-Konzentrationen, ist aber nicht genau mit diesen identisch. Wahrscheinlich sind diese Unterschiede durch das im

Sediment wechselnde Calcit/Aragonit-Verhältnis (in Aragonit wird mehr Sr eingebaut, MÜLLER 1968) begründet. Sr muss wegen diese Unterschiede ebenfalls separat dargestellt werden.

Im Rahmen der Diskussion (Kap. 2.5.3) wird auf die Elementverhältnisse in den Kernen eingegangen.

2.5.1 Nussbaumer See

Bei der Darstellung der Einzelwerte anhand der Tiefenprofile wird mit dem landwärtigsten Kern des Bohrtransektes begonnen, es folgen die Kerne in Richtung Seemitte, daran schließt sich noch der nicht aus dem Transekt stammende K1 an. Die Mittelwerte der Hauptbestandteile CaCO_3 und organische Substanz der drei Hauptsedimenttypen und die zugehörigen Standardabweichungen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Bei der Darstellung der organischen Substanz wurde der Glühverlust dem berechneten organischen Gehalt (Kap. 6.1.6 & 6.1.8) vorgezogen.

L16

Torfe, Kalkmudde und Seekreide zeigen die für sie typischen Gehalte (Abbildung 20, Tabelle 7). Die makroskopisch als Torf angesprochene Schicht bei 25 cm unter GOK zeigt ähnlich wie in L13

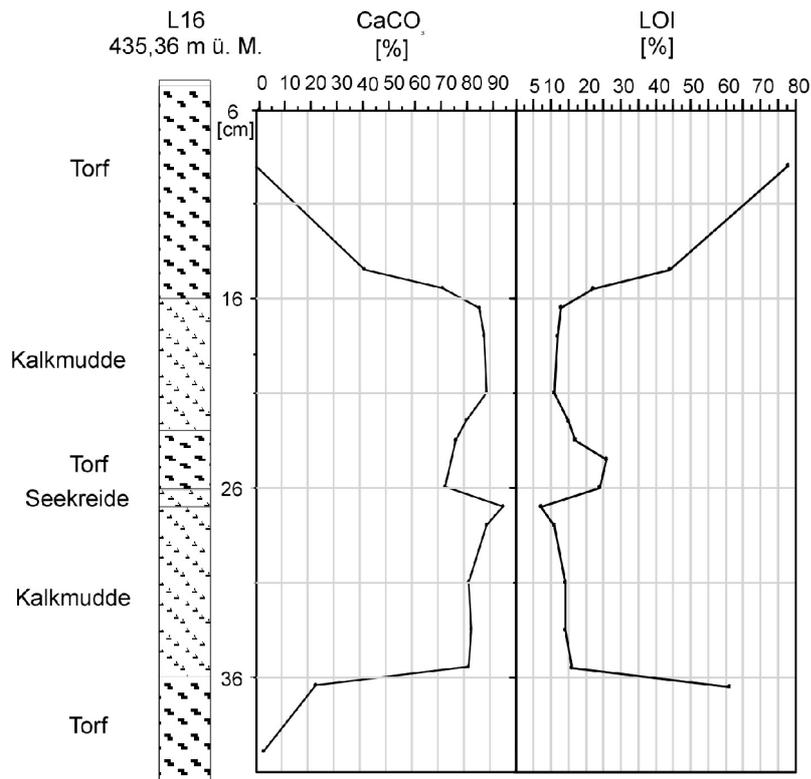


Abbildung 20: Stratigraphie, Karbonatgehalt und Glühverlust als Maß des Gehalts an organischer Substanz in Bohrkern NBS L16. Weitere Erläuterungen siehe Text.

(s.d.) die einer Kalkmudde entsprechenden Gehalte. Das Glühverlustmaximum der vorgenannten

Schicht erscheint in der Abbildung 20 gegenüber dem Karbonatminimum verschoben zu sein. Tatsächlich wurde jedoch bei der Glühverlustbestimmung eine zusätzliche Probe zur Verifikation des Maximums analysiert, welche nun das eigentliche Maximum bildet. Die Seekreide in Kern L16 ist im Vergleich zu den anderen Kernen karbonatarm und mit hohen Konzentrationen an organischer Substanz ausgebildet (Tabelle 7).

Kern	organisches Sediment		Kalkmudde		Seekreide	
	org. Substanz [%]	CaCO ₃ [%]	org. Substanz [%]	CaCO ₃ [%]	org. Substanz [%]	CaCO ₃ [%]
L16	78 (n=1)	0	25 (16,4; n=9)	68 (21,2)	11 (2,3; n=5)	89 (3,4)
L2	56 (n=1)	4	15 (9,0; n=17)	68 (15,3)	6 (1,6; n=9)	90 (2,1)
L14	wg. Kontamination nicht nutzbar					
L13	57 (5,7; n=2)	16 (0,7)	29 (10,3; n=5)	59 (15,8)	7 (2,2; n=9)	93 (3,5)
L12	Karbonatgehalt nicht					
L11	bestimmbar					
L10	77 (0,7; n=2)	nicht bestimmt	19 (8,0; n=9)	74 (10,3)	6 (2,6; n=10)	93 (2,7)
W2	-	-	22 (10,6; n=28)	67 (14,6)	-	-
W3	-	-	18 (7,9; n=32)	69 (13,3)	-	-
W4	54 (n=1)	6	16 (4,9; n=55)	70 (9,8)	-	-
K1	74 (4,4; n=3)	2 (2,1)	23 (n=1)	63	6 (1,6; n=20)	95 (4,1)

Tabelle 7: Mittelwerte (fett gedruckt) der organischen Substanz und des Karbonatgehaltes der Sedimenttypen aus dem Nussbaumer See. In Klammern jeweils Standardabweichung und Probenanzahl n, berücksichtigt wurden nur Proben, an denen beide Parameter bestimmt wurden (Ausnahme: organisches Sediment).

L2

Der Kern NBS L2 dient als Beispiel für die „L“-Kerne (Kerne aus dem heute landfesten Bereich), da dieser Kern eine weitgehend lückenlose Sedimentation mit hoher zeitlicher Auflösung bietet. Neben CaCO_3 und LOI wurden Haupt- und Spurenelemente gemessen. Zur Sedimenttypklassifikation und darauf aufbauend der statistischen Auswertung der durchschnittlichen Haupt- und Spurenelementgehalte der Hauptsedimenttypen wurde der CaO-Gehalt (entsprechend dem sonst direkt bestimmten CaCO_3 -Gehalt) benutzt (Tabelle 7, Daten außerhalb des Zeitfensters wurden berücksichtigt).

Bevor die einzelnen Proben und Elemente besprochen werden, wird auf die verschiedenen Sedimente eingegangen.

Die Seekreiden weisen einen im Vergleich zu den anderen „L“-Kernen niedrigen CaCO_3 -Gehalt, aber einen vergleichbaren Gehalt an organischer Substanz auf (Tabelle 7).

Die Kalkmudden zeigen im Gegensatz dazu, wieder im Vergleich zu den anderen „L“-Kernen, eine durchschnittliche Karbonatkonzentration, aber einen niedrigen Gehalt an organischer Substanz (Tabelle 7).

Die als „organisches Sediment“ angesprochene Probe (Tabelle 7) liegt an der Grenze von Seekreide zum Torf im Liegenden (Abbildung 21). Der Gehalt an organischer Substanz dieser Probe ist für Torf oder ein Anmoor niedrig (vergl. L10, L16 und K1 sowie AABY 1986). 56% organische Substanz der genannten Probe entspricht der Konzentration des organischen Sediments in W4 (Kern aus dem heutigen See, wahrscheinlich auch damals unter Wasser). Dies läßt auf eine Beeinflussung der erwähnten Probe durch den See schließen.

Karbonatgehalt und Glühverlust zeigen im Kernverlauf die aufgrund der optischen Merkmale erwartete Dreiteilung des untersuchten Kernabschnittes:

Die helle Seekreide weist einen hohen Karbonatgehalt und einen niedrigen Gehalt an organischer Substanz auf.

In der dunkleren Kalkmudde ist die Karbonatkonzentration niedriger und der Gehalt an organischer Substanz höher.

Zum schwarzbraunen Torf hin übersteigt der Gehalt an organischer Substanz den Karbonatgehalt.

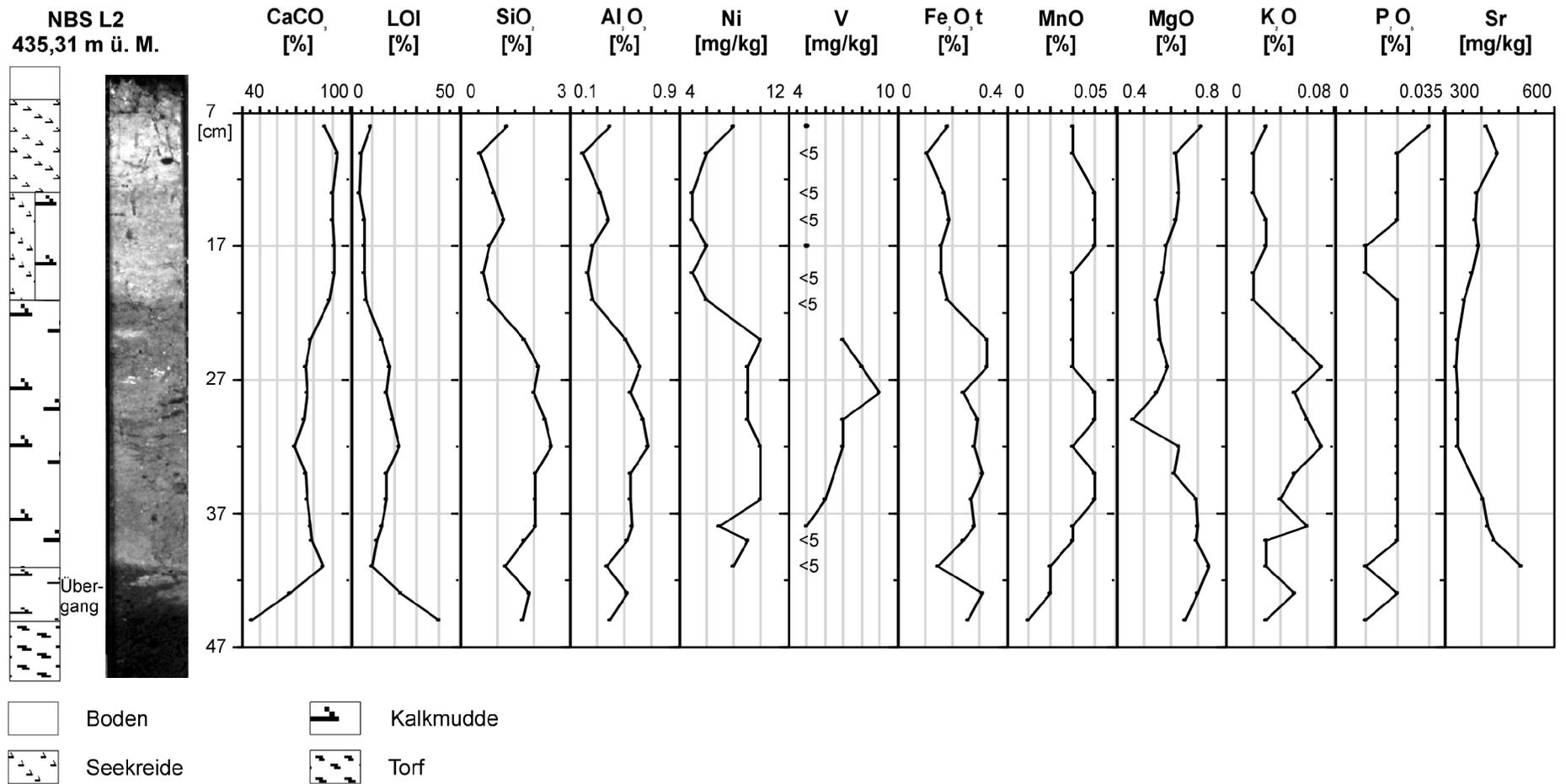


Abbildung 21: Stratigraphie und Verteilung ausgewählter Elemente in Bohrkern NBS L2. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Auffällig ist der fast weiße Bereich (Seekreide) bei 10 cm unter GOK, der sich geochemisch durch einen im Vergleich zu den angrenzenden Proben nur geringfügig erhöhten Karbonatgehalt auszeichnet (Abbildung 21). Hier ist davon auszugehen, dass bei der Beprobung die Abtrennung zu über- und unterlagernden Schichten wegen der unscharfen Schichtgrenze nur unvollständig gelang.

Die Schichtgrenzen zwischen Seekreide und Kalkmudde ist sowohl optisch als auch im geochemischen Profil als scharf zu bezeichnen, d.h. die Konzentrationsänderung erfolgt von einer Probe zur der darauf folgenden. Die Grenze zwischen Kalkmudde und Torf im Liegenden erscheint geochemisch als fließend, was optisch nicht der Fall und auf die Verzahnung beider Schichten zurückzuführen ist (Abbildung 21).

Kommen wir nun zu den weiteren geochemischen Parametern: SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , Cr, Ni, und V treten in der Kalkmudde des Bohrkerns NBS L2 in höheren Konzentrationen auf als in der Seekreide (Tabelle 8). MgO , MnO , P_2O_5 , Cu, Zn, Rb, Y und Pb weisen in beiden Sedimenttypen ähnliche Konzentrationen auf (Tabelle 8).

Um die Mittelwerte von L2 besser einschätzen zu können, sind zum Vergleich die Ergebnisse des Bohrkerns Nu8 (Ostbecken des Nussbaumer Sees, untersucht von RÖSCH 1983) angegeben. Die mittleren Konzentrationen wurden dazu aus dem Diagrammabschnitt von RÖSCH (1983), der älter als 1500 BP ist, abgelesen. Zur Erklärung der extrem viel höheren Elementkonzentrationen in Kern L2 gegenüber Kern Nu8 (Tabelle 8) wird auf die anschließende Diskussion (Kap. 2.5.3) verwiesen.

Seekreide:

	SiO ₂	Fe ₂ O _{3,t}	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Min	0,56	0,11	0,2	0,55	0,03	0,004	0,02	0,01
Max	1,28	0,19	0,39	0,71	0,04	0,01	0,03	0,03
Mittel	0,89	0,16	0,3	0,61	0,04	0,01	0,023	0,02
Nu 8 ¹⁾		0,007			0			

	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Pb	V
	[mg/kg]								
Min	<5	5	5	7	2	355	<3	<5	<5
Max	<5	8	7	31	4	447	9	5	5
Mittel	<5	6	6	12	3	394	5		
Nu8 ¹⁾	<0,05	0,04	0,1	0,2				4	n.n.

Kalkmudde:

	SiO ₂	Fe ₂ O _{3,t}	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Min	1,25	0,15	0,37	0,46	0,01	0,02	0,03	0,01
Max	2,48	0,33	0,67	0,74	0,04	0,04	0,07	0,02
Mittel	1,96	0,27	0,54	0,63	0,03	0,03	0,05	0,02
Nu 8 ¹⁾		0,007			0,0003			

	Cr	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Pb	V
	[mg/kg]								
Min	<5	7	5	10	4	333	<3	<5	<5
Max	7	10	7	17	6	509	7	5	9
Mittel	6	9	6	13	5	384	5		7
Nu 8 ¹⁾	<0,05	0,04	0,1	0,2				4	n.n.

Tabelle 8: Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Elementkonzentrationen in unterschiedlichen Sedimenten des Bohrkerns NBS L2. ¹⁾ Daten von RÖSCH 1983 zum Vergleich. Weiter Erläuterungen siehe Text.

Es folgt eine Beschreibung der Konzentrationsänderungen der einzelnen Elemente (d.h. typische Elemente stellvertretend für Elementgruppen wie am Kapitelanfang besprochen) im Kernverlauf von NBS L2. Dabei wird auf auffällige Konzentrationsänderungen jedes Elementes näher eingegangen.

Wie schon bei den Parametern „organische Substanz“ und „Karbonatgehalt“ läßt sich der untersuchte Kernabschnitt in drei Einheiten unterteilen:

Bis 21 cm, also im Bereich der Seekreide, zeigen SiO_2 , Al_2O_3 , Ni, V, Fe_2O_3 und K_2O niedrige Konzentrationen (Abbildung 21).

Zwischen 21 und 41 cm steigen die Konzentrationen an.

Zum Torf hin (45 cm unter GOK) fallen sie wieder ab. Dieser Konzentrationsrückgang ist vor allem bei den Hauptelementen SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 und K_2O nur schwach ausgeprägt.

Ein untergeordnetes Maximum der Elemente SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 liegt in Probe 15 vor. Beachtenswert ist das untergeordnete Maximum von Ni und V, das jedoch 2 cm tiefer liegt als das der vorher genannten Elemente (Abbildung 21). Hier kann an eine Elementverlagerung gedacht werden, was jedoch der These widerspricht, dass die genannten Elemente als Silikate vorliegen. K_2O , dessen Herkunft ebenfalls auf Silikate zurückgeführt wird, zeigt jedoch in den beiden genannten Proben ein lokales Maximum.

Das Minimum der Ni-Kurve in Probe 38 wird als Ausreißer interpretiert.

Ein weiteres auffälliges Minimum zeigt sich bei SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 und K_2O in Probe 41. Kontamination oder ein Messfehler zur Erklärung dieser Konzentrationsänderung scheidet aus, da dieses Minimum auch beim Gehalt der organischen Substanz und bei S zu sehen ist.

Eine Änderung der Redoxbedingungen, wie im Zusammenhang mit der MnO-Kurve angesprochen (s.u.), könnte ein Grund für die Konzentrationsabnahme sein. Dagegen spricht, dass die Konzentrationen zum Torf hin wieder zunehmen. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit wäre ein einfacher Verdünnungseffekt durch den gestiegenen CaCO_3 -Gehalt (geschlossener Datensatz, s.a. Einleitung dieses Kapitels).

Die Ursache für dieses bei vier Elementen vorkommende Minimum kann nicht zufriedenstellend erklärt werden.

MnO zeigt ein ähnliches Verhalten wie Fe_2O_3 , die Konzentrationsänderungen sind bis 36 cm unter GOK gering, der Konzentrationsrückgang zum Torf hin von 0,04% auf 0,02% ist jedoch deutlich (Abbildung 21). Dieser Unterschied des Verhaltens zwischen MnO- und Fe_2O_3 -Konzentrationen

könnte auf eine Änderung des pH/Eh-Wertes am Übergang der Kalkmudde zum Torf zurückzuführen sein.

Im Hangenden von 34 cm zeigt MgO durchschnittlich 0,1% geringere Konzentrationen als der Kernabschnitt zwischen 34 und 45 cm (Abbildung 21). Auffällig im Konzentrationsverlauf von MgO ist die geringe Konzentration in Probe 30.

Die Konzentrationsänderungen von P_2O_5 liegen mit Ausnahme der obersten Probe im Fehlerbereich. Der erhöhte Wert der obersten Probe könnte durch Düngung des Feldes, in dem der Kern genommen wurde, verursacht worden sein.

Die Sr-Konzentration zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die $CaCO_3$ -Konzentrationen (Abbildung 21). Folgende Elemente lagen in allen Proben unter der Bestimmungsgrenze: Ga, Nb, sowie Co.

L14

Ein überwiegender Teil dieses Bohrkerns wurde durch die Bohrung kontaminiert: der Kern bestand aus zwei umeinander liegende Sedimentlagen, die sich nicht trennen ließen. Die Daten wurden nicht ausgewertet.

L13

Die unterschiedlichen Sedimente spiegeln sich auch in diesem Kern im Gehalt an organischer Substanz und Karbonat wieder: hohe Werte für die organische Substanz im Torf, hohe Karbonatkonzentrationen in Seekreide und Kalkmudde (Abbildung 22). Die makroskopisch als Torf angesprochene Schicht bei 27 cm u. GOK fällt aufgrund der chemische Zusammensetzung noch in das Feld der Kalkmudden. Der Glühverlust der organischen Sedimente übersteigt nie 65%, der Karbonatgehalt liegt bei 15% und ist im Vergleich zu den andern Kernen hoch (Tabelle 7). Dies deutet auf eine dritte sedimentbildende Komponente, möglicherweise Silikate, in diesen Schichten hin.

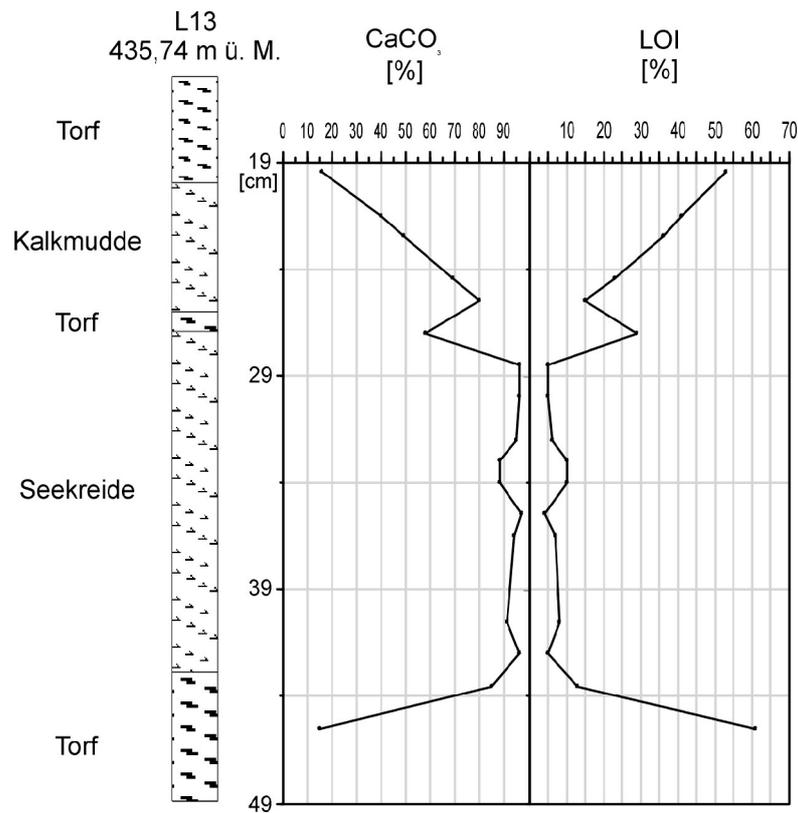


Abbildung 22: Stratigraphie, Karbonatgehalt und Glühverlust als Maß des Gehalts an organischer Substanz in Bohrkern NBS L13. Weitere Erläuterungen siehe Text.

L12

Der Verlauf der Glühverlustkurve in Bohrkern L12 zeigt ein ähnliches Bild wie in Kern L11 (Abbildung 23). Als Kalkmudde kann die Schicht zwischen 34 und 40 cm unter GOK ausgegliedert werden. Die Glühverluste von Seekreide und Kalkmudde (jeweils optische Ansprache) entsprechen denen in Kern L11; dabei ist die Seekreide im Hangenden der Kalkmudde in Bohrkern L12 deutlicher ausgeprägt als in Kern L11. Die organischen Sedimente weisen Glühverluste von 35% bis 55% auf. Diese relativ niedrigen Maximalwerte können durch die Probenlage erklärt werden: die Torfschicht wurde in ihrem Grenzbereich zur Seekreide beprobt und ist durch das limnische Sediment beeinflusst.

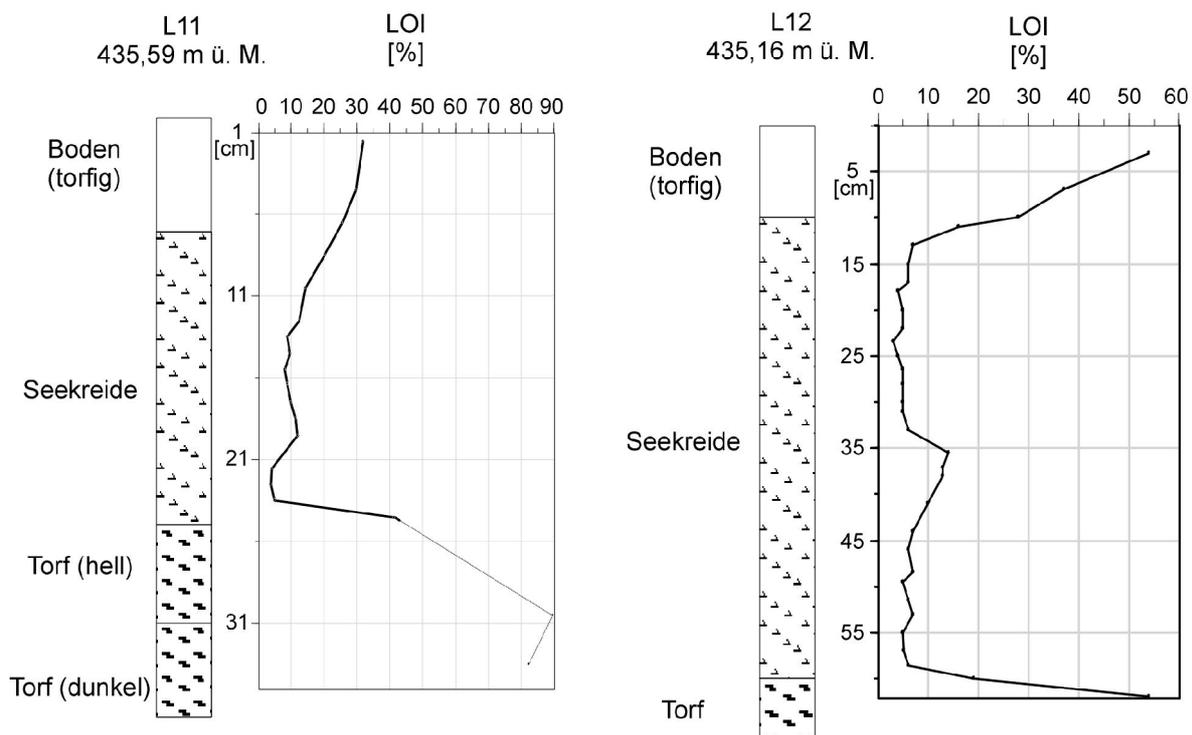


Abbildung 23: Stratigraphie, Karbonatgehalt und Glühverlust als Maß des Gehalts an organischer Substanz der Bohrkerne NBS L11 und L12. Zu beachten sind die unterschiedliche Maßstäbe der beiden Bohrkerne. NBS L12 in den obersten 5 cm gestört. Weitere Erläuterungen siehe Text.

L11

An diesem Kern und an dem Kern L12 wurde zur schnellen Bestandsaufnahme nur die Glühverlustanalyse durchgeführt (Abbildung 23). Die chemische Differenzierung von Seekreiden und Kalkmudden kann hier nur annäherungsweise angewandt werden. Die Glühverlustbestimmung zeigt in Kern L11 sowohl für organische Sedimente als auch für Seekreiden bzw. Kalkmudden typische Werte (Abbildung 23). Ähnlich wie in NBS L12 kann eine Kalkmuddeschicht zwischen 18 und 21 cm (makroskopisch nicht erkennbar) und des Weiteren eine Kalkmudde am Übergang der Seekreide in den torfigen Boden ausgewiesen werden. Der Glühverlust der als Seekreiden angesprochenen Sedimente liegt unter 10%, der der Kalkmudden etwas darüber. Die organischen Sedimente weisen Gehalte von über 30% bis maximal 90% auf. Auffällig erscheint der unterschiedliche Gehalt von hellem und dunklem Torf.

L10

Die organische Substanz und der Karbonatgehalt schwankt innerhalb einer Schicht nur wenig (Abbildung 24). Die optisch fließenden Schichtgrenzen (in Abbildung 24 nicht dargestellt) spiegeln

sich in den geochemischen Daten wider. Interessant ist die langsame Ab- und Zunahme des Karbonatgehaltes in der mittleren organischen Schicht. Obwohl das Sediment makroskopisch rein organisch (schwarzbraune Farbe) erscheint, beträgt der Karbonatgehalt mehr als 50%. Da hingegen der Torf im Liegenden der Sequenz einen Glühverlust von über 70% zeigt, der Karbonatgehalt somit unter 30% liegen muß, unterstützen diese zwei geochemischen Parameter den makroskopischen Befund, dass es sich bei der mittleren organischen Schicht nicht um einen

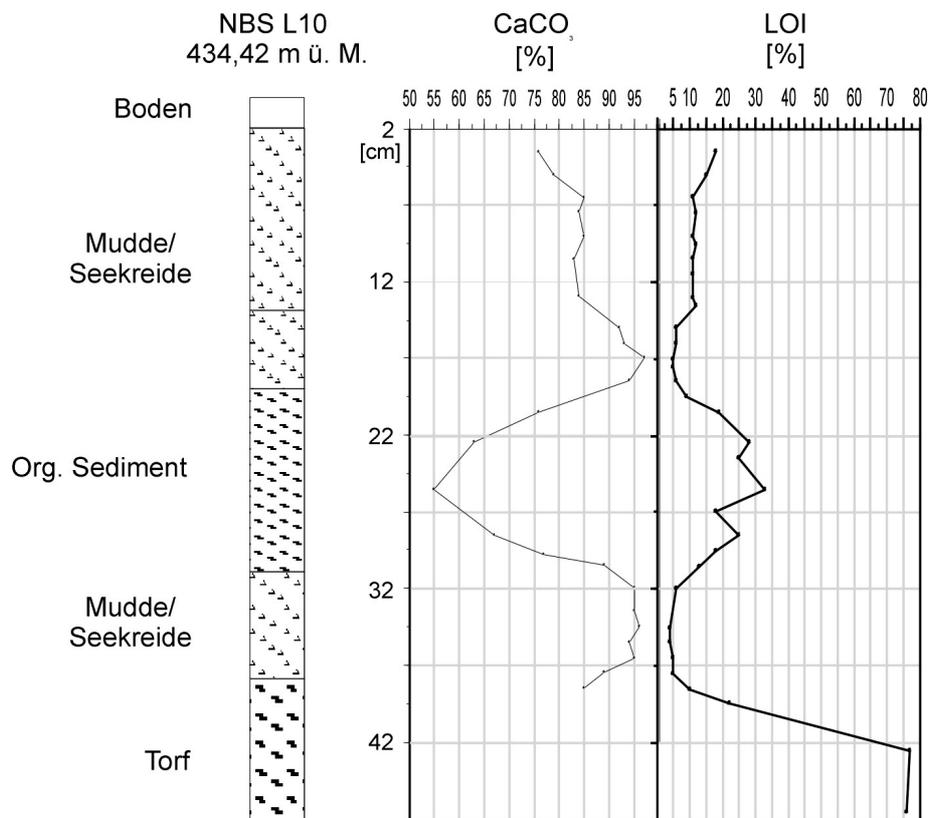


Abbildung 24: Stratigraphie, Karbonatgehalt und Glühverlust als Maß des Gehalts an organischer Substanz in Bohrkern L10. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Torf, sondern um ein Flachwassersediment handelt. Die Mittelwerte (Tabelle 7) der Hauptsedimenttypen in Kern L10 sind mit Ausnahme des vergleichsweise hohen Karbonatgehaltes der Kalkmudde typische für die Sedimente im Nussbaumer See.

W2

Der generelle Eindruck von Kern W2 ähnelt dem der Kerne W3 und W4: Die Karbonatwerte liegen zwischen 25% und 86% (Abbildung 25); der Grenzwert zwischen Kalkmudde und Seekreide wird nur einmal erreicht, alle Proben wurden daher dem Sedimenttyp Kalkmudde zugerechnet. Die Schichtgrenzen sind, wie auch in den anderen „W“-Kernen (Kerne aus dem heutigen See), fließend. Die Mittelwerte von Karbonatgehalt und Glühverlust liegen im Durchschnitt der Kerne aus dem Nussbaumer See (Tabelle 7). Der Glühverlust der torfigen Mudde in Probe 142 liegt mit über 55% höher als der vergleichbarer Sedimente der Nachbarkerne.

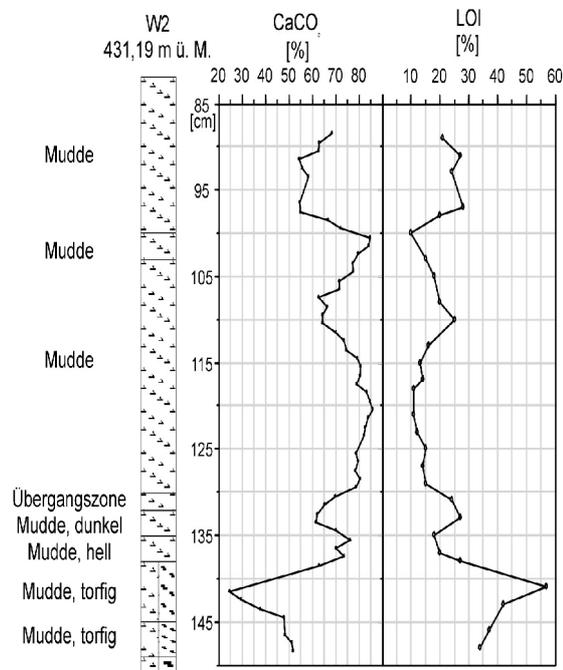


Abbildung 25: Stratigraphie, Karbonatgehalt und Glühverlust als Maß des Gehalts an organischer Substanz in NBS W2. Weitere Erläuterungen siehe Text.

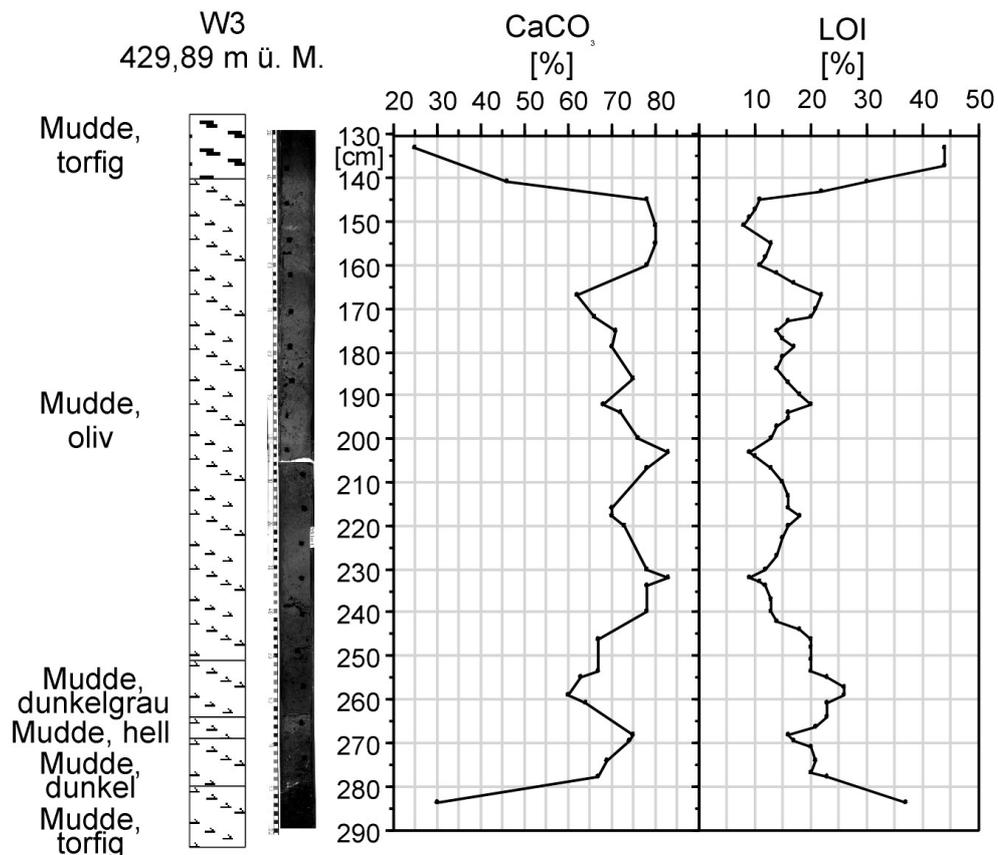


Abbildung 26: Stratigraphie, Karbonatgehalt und Glühverlust als Maß des Gehalts an organischer Substanz in NBS W3. Weitere Erläuterungen siehe Text.

W3

Alle Proben dieses Bohrkernes können aufgrund des Karbonatgehaltes als Kalkmudde bezeichnet werden. In den makroskopisch als torfige Mudde angesprochenen Kernabschnitten liegt der Karbonatgehalt zwischen 25% und 30%; in den anderen Kernbereichen bewegt er sich zwischen 60% und 83% (Abbildung 26). Der Glühverlust verhält sich komplementär zum Karbonatgehalt (Abbildung 26). Die Mittelwerte von Karbonatgehalt und Glühverlust zeigen keine Auffälligkeit gegenüber den anderen Bohrkernen (Tabelle 7). Die für Kern W4 geltenden Aussagen bezüglich Schichtgrenzen und Konzentrationsänderungen innerhalb einer Schicht gelten auch für Bohrkern W3.

W4

Neben CaCO_3 und LOI wurden an diesem Kern Haupt- und Spurenelemente gemessen. Er ist exemplarisch für die „W“-Kerne (Bohrkerne aus dem heutigen See), da Hiaten mittels der Pollenanalyse weitgehend ausgeschlossen werden können. Haupt- und Spurenelemente konnten an W4 nicht an den selben Proben gemessen werden. Deshalb wurden immer zwei benachbarte Proben aus der gleichen Schicht analysiert. Zur statistischen Auswertung der Haupt- und Spurenelementgehalte der Hauptsedimenttypen wurde der CaO-Gehalt (entsprechend dem sonst direkt bestimmten CaCO_3 -Gehalt) der jeweils zugehörigen Probe zur Sedimenttypklassifikation benutzt (Tabelle 9).

Der Bereich von 114 cm bis 224 cm unter Sedimentoberfläche ist als Kalkmudde anzusprechen (Tabelle 7). Die Gehalte von organischer Substanz und Karbonatgehalt gleichen denen der anderen „W“-Kerne. In den Kernen aus dem heutigen See, so auch in NBS W4, sind die Grenzen zwischen zwei Schichten fließend, im Gegensatz zu den Bohrkernen aus dem heute landfesten Bereich (Präfix „L“). Wegen dieser unscharfen Schichtgrenzen ändern sich Karbonatgehalt und Glühverlust von Probe zu Probe, die Schwankungen innerhalb einer makroskopisch definierten Schicht sind in den „W“-Kernen größer als in den „L“-Kernen. Glühverlust und Karbonatgehalt bilden, anders als in den anderen Kernen, nur im Gesamtverlauf eine komplementäre Einheit. Sehr gut zu sehen ist dies in den folgenden Fällen: Bei 150 cm unter Sedimentoberfläche nimmt der Glühverlust ab und bleibt dann bei rund 12%, während der Karbonatgehalt ebenfalls abnimmt (von 80% auf 75%, Abbildung 27). Bei 180 cm sinkt der Karbonatgehalt innerhalb von 6 cm um 10% während der Glühverlust nicht so abrupt, d.h. über gut 10 cm um nur 5% zunimmt.

Da der Quotient von Si und Al (s. Kap. 2.5.3) hier bei 2 liegt und keine Veränderungen zur Tiefe hin zeigt, gibt es keinen Hinweis auf Diatomeen in sedimentbildenden Konzentrationen.

Möglicherweise sind die Abweichungen der Glühverlust- und der Karbonatkurve vom erwarteten Verlauf auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, wie der Rückgang des Karbonatgehaltes in Probe 222: der direkt gemessene CaCO_3 -Gehalt liegt bei 50%, während der aus dem CaO-Gehalt berechnete CaCO_3 -Wert 74% beträgt.

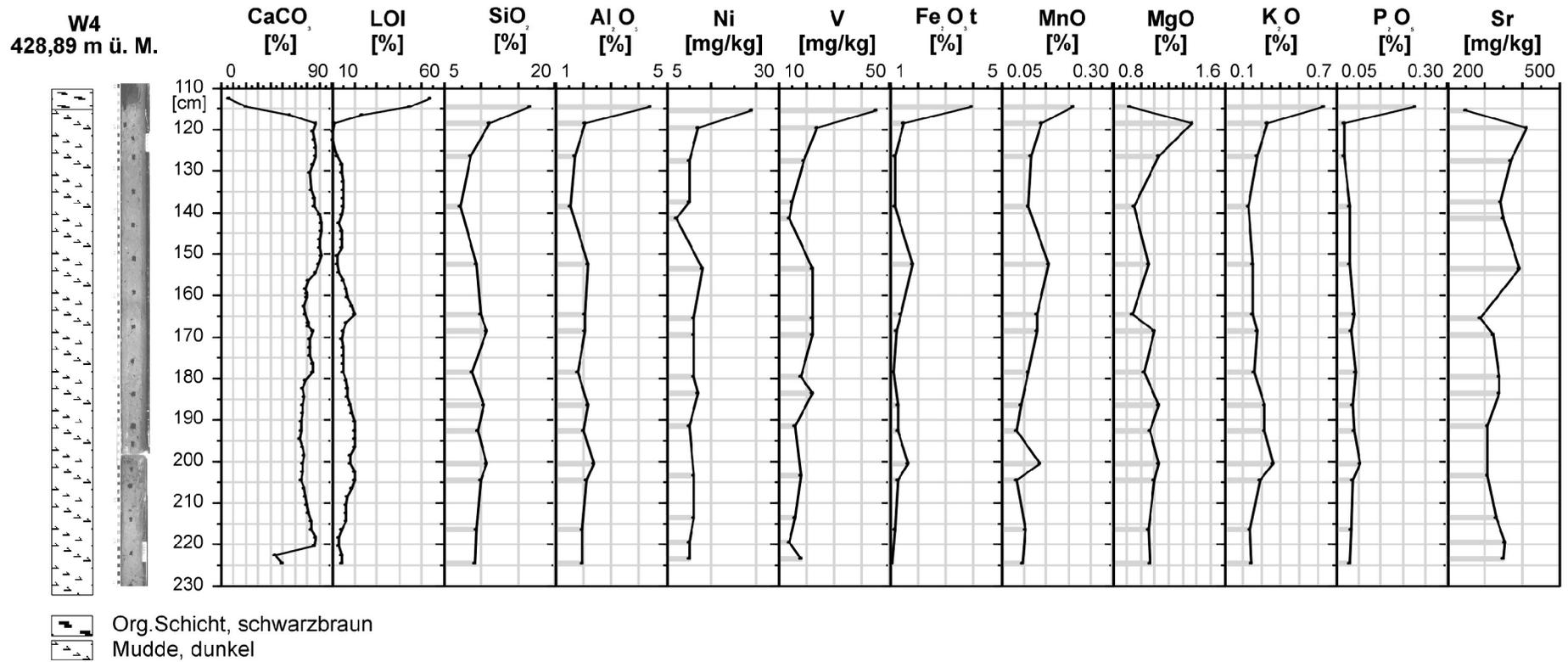


Abbildung 27: Stratigraphie und Verteilung ausgewählter Elemente in Bohrkern NBS W4. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Nun sollen die weiteren geochemischen Parameter dargestellt werden:

Da der gesamte untersuchte Bereich bis auf die Probe 112 (organisches Sediment, Tabelle 7 und Abbildung 27) eine Kalkmudde ist, können die in Tabelle 9 aufgelisteten geochemischen Kennwerte als charakteristisch für den gesamten untersuchten Kernabschnitt angesehen werden.

	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O _{3,t}	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Min	7,33	11,42	1,07	1,55	0,92	0,08	0,11	0,23	0,07
Max	16,55	42,56	3,94	4,39	1,36	0,21	0,18	0,64	0,23
Mittel	10,11	38,18	1,51	2,17	1,07	0,12	0,13	0,31	0,09
Nu 8 ¹⁾		39	0,007			0,0003			

	Cr	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Co	V
	[mg/kg]										
Min	<10	7	16	<5	11	249	<5	15	<3	<5	14
Max	54	24	53	6	38	411	12	52	4	6	45
Mittel	17	10	19		17	330	8	35	3		16
Nu 8 ¹⁾	0,05	0,04	0,2								n.n

Tabelle 9: Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Elementkonzentrationen im Sediment des Bohrkerns NBS W4. ¹⁾Daten von RÖSCH 1983 zum Vergleich. Weiter Erläuterungen siehe Text.

Wie für Kern NBS L2 sind auch hier zum Vergleich die Ergebnisse aus dem Kern Nu8 (RÖSCH 1983, Ostbecken des Nussbaumer Sees) angegeben. Unterschiede zwischen NBS W4 und Nu8 werden in der anschließenden Diskussion (Kap. 2.5.3) erörtert.

Im Folgenden wird auf die im Diagramm auffälligen Konzentrationsminima und -maxima der einzelnen Elemente eingegangen (Abbildung 27, vom Hangenden zum Liegenden).

Mit Ausnahme von CaCO₃, MgO und Sr sind alle Elementgehalte in Probe 114,5 um das ein- bis dreifache gegenüber den Konzentrationen im weiteren Kernverlauf erhöht. Die erhöhten P₂O₅- und K₂O-Werte können in dieser Probe sowohl auf den erhöhten Gehalt an organischer Substanz als auch auf einen vergleichsweise erhöhten Silikatgehalt (SiO₂ und Al₂O₃ erhöht) zurückzuführen sein. MgO hat seinen Maximalwert in der nach unten folgenden Probe 118,5.

In Probe 140 zeigen SiO_2 , Al_2O_3 , Ni, V, Fe_2O_3 , MnO, MgO und Sr eine Minimumkonzentration. Fe_2O_3 und MnO sowie Sr haben in Probe 152,5 eine Maximumkonzentration; ein weiteres Maximum der Fe_2O_3 - und MnO-Konzentrationen weist Probe 200 auf. Bei Sr fällt die Minimumkonzentration in der Probe 165,5 auf, die durch den geringeren Karbonatgehalt zu erklären ist.

K1

Das Material aus dem K1 sedimentierte im selben Zeitabschnitt wie das in den Bohrkernen untersuchte. Deshalb kann K1, obwohl er nicht aus dem Bohrtransekt stammt (Abbildung 2), mit den Bohrkernen verglichen werden.

Die Seekreide in K1 ist mit Maximalwerten von 100% sehr karbonatreich. In das Feld der Kalkmudden fällt nur eine einzige Probe (Tabelle 7). Optisch wurden Kalkmuddelagen ausgeschieden. Diese weisen jedoch gegenüber den optisch als Seekreide bezeichneten Straten einen maximal um 12% verringerten CaCO_3 -Gehalt und einen um bis zu 4% erhöhten Gehalt an organischer Substanz auf. Somit sind auch die optisch als Kalkmudden angesprochenen Schichten geochemisch als Seekreide zu bezeichnen (Abbildung 28).

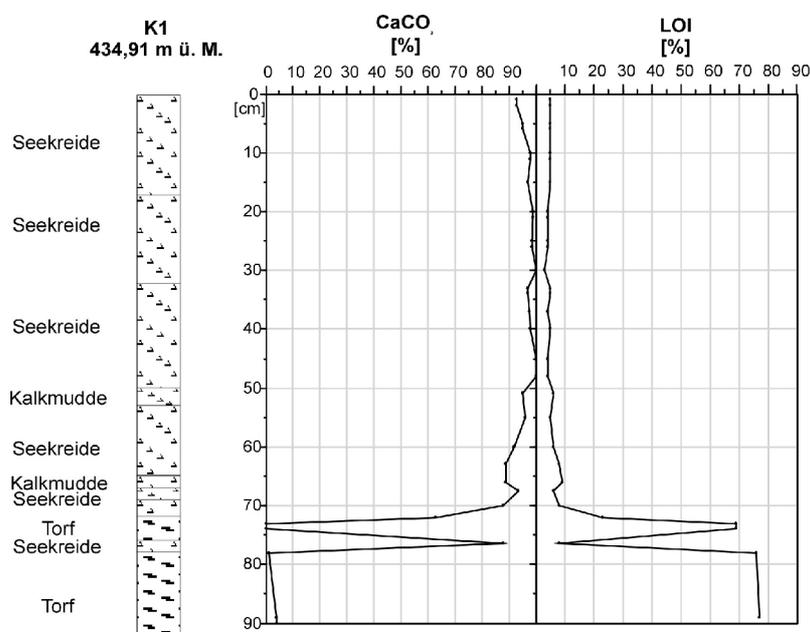


Abbildung 28: Stratigraphie, Karbonatgehalt und Glühverlust als Maß des Gehalts an organischer Substanz in NBS K1 (Metallkasten). Tiefenangaben ab Kastenoberkante (20 cm u. GOK). Weitere Erläuterungen siehe Text.

In die Seekreide ist an dieser Probenahmelokalität eine organische Schicht eingeschaltet, deren geochemischen Werte sie als Torf kennzeichnen, makroskopisch ist diese Schicht für einen Torf zu hart.

Geochemischer Vergleich der Bohrkerne W4 und L2

Auf Unterschiede und Ähnlichkeiten des Karbonatgehaltes und des Glühverlustes ist bereits bei der Beschreibung der einzelnen Kerne eingegangen worden und die Daten sind in Tabelle 7 zusammengefasst worden. Hier sollen die weiteren geochemischen Daten der exemplarisch untersuchten Bohrkerne NBS W4 und NBS L2 miteinander verglichen werden.

Alle hier aufgeführten Elemente mit Ausnahme des Sr sind in W4 angereichert (Tabelle 10). Am stärksten ist dies bei den Hauptelementen mit Ausnahme des MgO ausgeprägt. Bei den Spurenelementen ist der Anreicherungsfaktor niedriger, auffallend dabei die Faktoren von Ni und Zn. Betrachtet man die Kombination der am stärksten in NBS W4 angereicherten Elemente, so sieht man, dass diese typisch für Silikate ist.

	SiO ₂	Fe ₂ O _{3,t}	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cr	Ni	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	V
W4/L2 Seekreide	11	9	7	1,8	3	13	13	5		1	1	6	1	1		
W4/L2 Kalkmudde	5	6	4	1,7	4	4	6	5	3	1	1	3	1	1	4	2

Tabelle 10: Anreicherungsfaktoren (auf Basis der Mittelwerte) ausgewählter Elemente aus NBS W4 gegenüber NBS L2.

Offensichtlich hängt die Menge an Silikaten (deren Elementgehalt von den in Tabelle 10 stehenden Elementen repräsentiert wird) im Sediment nicht vom Sedimenttyp oder vom Karbonatgehalt, sondern von der Lage des Bohrkerne und/oder der Wassertiefe ab.

2.5.2 Bodensee-Gnadensee

Im Folgenden werden wie im vorhergehenden Abschnitt 2.5.1 zunächst für die einzelnen Kerne die sedimentbildenden Komponenten Karbonat und organische Substanz behandelt, anschließend jeweils die Ergebnisse der Haupt- und Spurenelementanalyse anhand von typischen Elementen vorgestellt.

Gn4

Der mittlere Karbonatgehalt und der mittlere Gehalt an organischer Substanz (C_{org} -Konzentration multipliziert mit dem Faktor 2, s. Kap. 6.1.6) der Kalkmudde- und Seekreideschichten von Gn4 liegt im Durchschnitt der anderen Kernen. Die Werte sind Tabelle 11 zu entnehmen. Organisches Sediment wurde weder in Gn4 noch in einem der anderen Kerne aus dem Gnadensee gefunden.

Kern	Kalkmudde		Seekreide	
	org. Substanz [%]	CaCO ₃ [%]	org. Substanz [%]	CaCO ₃ [%]
Gn4	3 (0,4; n=10)	82 (2,2)	2 (0,5; n=22)	89 (2,1)
Gn5	5 (1,0; n=15)	81 (3,2)	2 (1,0; n=12)	91 (2,9)
Gn6	4 (1,0; n=19)	81 (2,8)	2 (0,8; n= 5)	88 (2,3)
Gn7	2 (0,5; n=24)	83 (2,3)	2 (0,5; n=12)	87 (1,2)

Tabelle 11: Mittelwerte (fett gedruckt) der organischen Substanz und des Karbonatgehaltes der Sedimenttypen aus dem Gnadensee. In Klammern jeweils Standardabweichung und Probenanzahl n; berücksichtigt wurden nur Proben, bei denen beide Parameter bestimmt wurden.

Betrachtet man den Verlauf der beiden Hauptkomponenten, Karbonat und organische Substanz (hier als C_{org} ausgedrückt), über die Kerntiefe (Abbildung 29), so ist eine Abnahmetendenz des organischen Kohlenstoffgehaltes mit der Tiefe festzustellen. Der Trend des Karbonatgehaltes zu höheren Werten mit zunehmender Tiefe ist nur schwach ausgeprägt. Die negative Korrelation zwischen den beiden Komponenten ist jedoch eindeutig.

Im Folgenden wird die makroskopische Erscheinung (Abbildung 29) in Zusammenhang mit den Hauptkomponenten gesetzt.

Die optisch helle Schicht zwischen 505 und 512 cm ist durch einen hohen CaCO_3 -Gehalt und einen niedrigen C_{org} -Gehalt gekennzeichnet.

Bei der zum Liegenden folgenden Schicht (512-551 cm, Abbildung 29) ist die langsame Farbveränderung zum Hellen in Richtung Liegendes durch den zunehmenden CaCO_3 - und abnehmenden C_{org} -Gehalt zu erklären. Die Grenze zur Schicht im Liegenden (551-635 cm) ist optisch scharf, geochemisch jedoch nur undeutlich zu fassen. Die durch diesen Schichtwechsel erfassten Veränderungen im Sedimentationsgeschehen beschränken sich auf die farbgebende Komponente und wahrscheinlich auf den Anteil an silikatischem Detritus (s. folgender Abschnitt). Der gebänderte Kernabschnitt von 551 bis 635 cm Tiefe ist durch geringe, aber häufige Konzentrationsänderungen von CaCO_3 und C_{org} gekennzeichnet. Diese Änderungen sind auf die Bänderung zurückzuführen. Jedoch weist diese rein optisch als Kalkmudde anzusprechende Schicht mit Ausnahme einer Probe stets einen Karbonatgehalt $>85\%$ auf (Abbildung 29), ist geochemisch also eine Seekreide und auch die dunklen Bänder haben einen für Kalkmudden untypischen hohen Karbonatgehalt.

In Kern Gn4 wurden die Haupt- und Spurenelemente einer Probe aus einer Seekreideschicht (509,5-511,5 cm) und einer Probe aus der optisch als Kalkmudde (s. vorhergehender Absatz) angesprochenen Schicht (569-571 cm) analysiert. Ziel war die Charakterisierung und der Vergleich der beiden Sedimenttypen.

Des Weiteren sollte herausgefunden werden, ob es einen geochemischen „Fingerabdruck“ dieser Schichten gibt, der eine eindeutige Korrelation mit den entsprechenden Schichten der anderen Kernen zulässt. Dies ist nicht der Fall, sowohl Haupt-, als auch Spurenelemente liegen in dem für alle vier aus dem Gnadensee untersuchten Kerne typischen Bereich. Für eine diskrete Schicht sind keine typischen Elementkonzentrationen zu erkennen.

Der Quotient aus den Elementgehalten der Probe 511,5 (Seekreideschicht) und den Elementgehalten der Probe 571 (Kalkmuddeschicht) zeigt eine An- (<1) bzw. eine Abreicherung (>1) des jeweiligen Elementes in der Kalkmudde bzw. Seekreide (Abbildung 30). Diese ist typisch für alle Kerne aus dem Markelfinger Winkel.

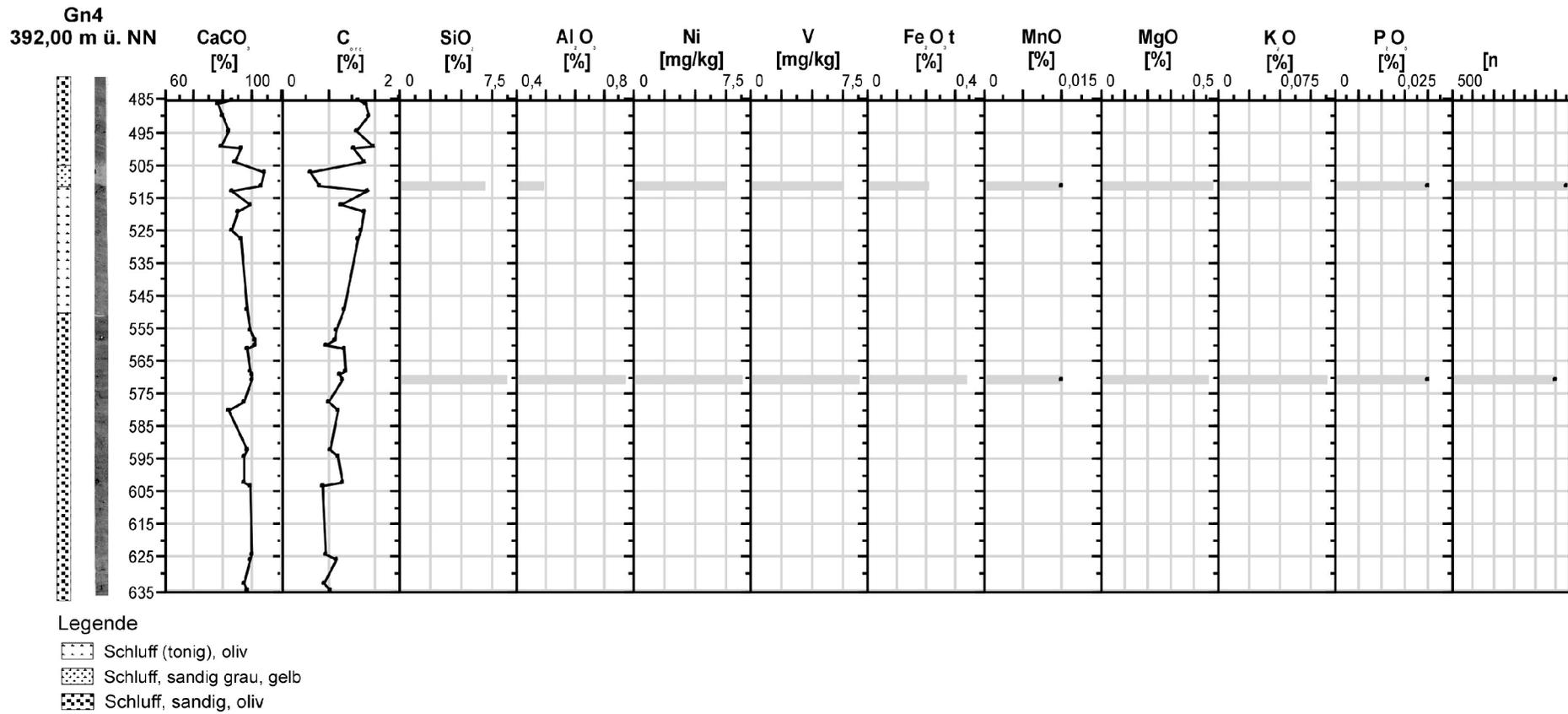


Abbildung 29: Stratigraphie und Verteilung ausgewählter Elemente in Bohrkern Gn4. Tiefenangaben cm u. GOK.

Cr, Ga, Zr, Nb, Pb, Th und Co lagen in beiden Proben unter der Nachweisgrenze. Die Ba-Bestimmung ist in allen Proben (sowie in den anderen Kernen) ungenau. Sie kann nur die Grössenordnung wiedergeben.

Nur CaCO_3 , MgO und Sr sind in der Seekreide an-, in der Kalkmudde abgereichert. MgO und Sr werden zusammen mit dem CaCO_3 aus dem Wasser ausgefällt (MÜLLER 1968, SCHÖTTLE & MÜLLER 1968). Die anderen Elemente sind entweder an die organische Substanz oder an Silikate gebunden, hier wird von einer überwiegenden Herkunft aus den Silikaten ausgegangen. Silikate sind allochthonen Ursprungs (s. Einführung von Kap. 2.5); damit sind allochthone Sedimentkomponenten in der „Kalkmudde“ (dunkel) stärker vertreten als in der Seekreide (hell). Dies deckt sich mit der im Kapitel „Röntgenographie“ getroffenen Feststellung, dass in den dunkleren Schichten der Sedimente aus dem Markelfinger Winkel erhöhte Quarzgehalte, ebenfalls allochthonen Ursprungs, vorhanden sind.

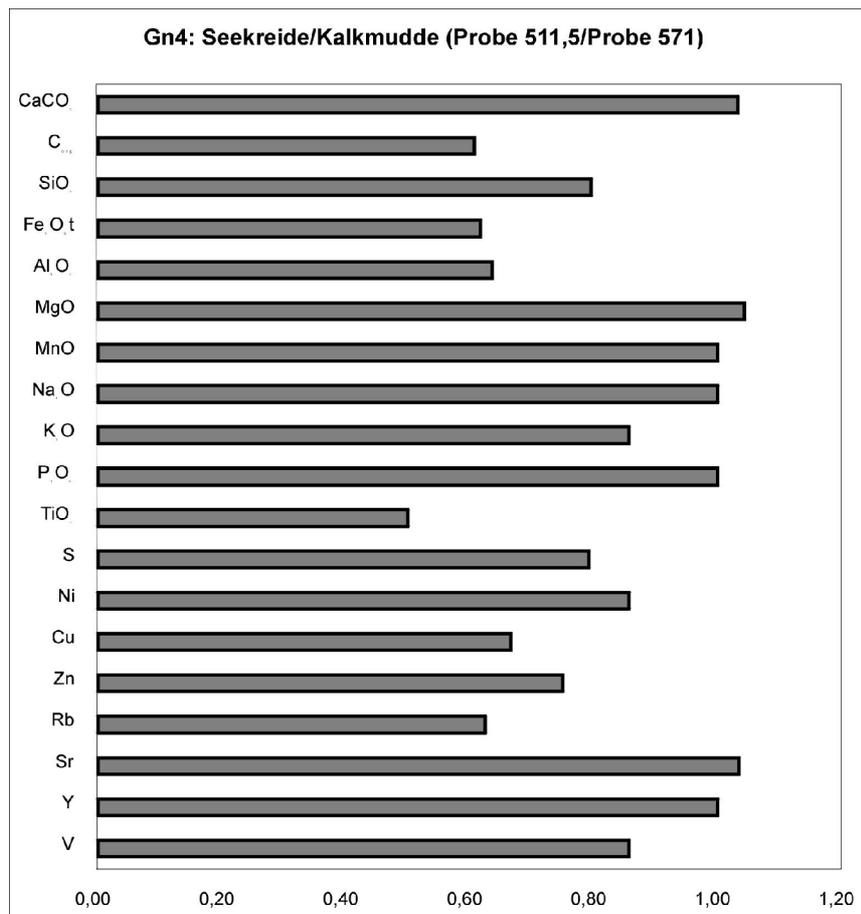


Abbildung 30: Elementquotienten des Kerns Gn4. Die Proben stammen aus einer Seekreide- und einer Kalkmuddeschicht.

Gn5

Auch in Kern Gn5 zeigen die beiden Hauptkomponenten CaCO_3 und C_{org} für Seekreiden und Kalkmudden für den Gnadensee typischen Konzentrationen (Tabelle 11, Abbildung 31). Dabei ist der durchschnittliche CaCO_3 -Gehalt der Seekreiden geringfügig höher als in den anderen Kernen aus dem Gnadensee. Betrachtet man den Verlauf der beiden Komponenten über die Kerntiefe, dann ist der höhere CaCO_3 - und niedrigere C_{org} -Gehalt der hellen Sedimente (Seekreide) sofort augenscheinlich. Umgekehrtes gilt für die dunkleren Schichten.

In Bohrkern Gn5 zeigen die CaCO_3 -Messungen sowohl für die Kalkmudden als auch für die Seekreiden die höchste Standardabweichung im Vergleich mit den anderen Gnadenseekernen (Tabelle 11). Dies bedeutet, dass die Konzentrationsunterschiede zwischen den einzelnen Proben, und damit zwischen den einzelnen Schichten in Gn5, stärker ausgeprägt sind als in den anderen Gnadenseekernen. Dies kann durch Hiaten und diskordante Sedimentwechsel in Gn5 erklärt werden.

Aus den verschiedenen Schichten des Kerns Gn5, wie auch des Kerns Gn7, wurden an ausgewählten Proben Haupt- und Spurenelemente analysiert. Straten mit erhöhtem terrigenen Eintrag und Hinweise auf anthropogenen Einfluß sollten auch hier wieder erfasst werden. Weiteres Ziel war die jeweilige Charakterisierung bzw. mögliche Unterscheidung zwischen dem Sedimentationsraum „Markelfinger Winkel“ (Gn5) und dem Ablagerungsbereich vor der Insel Reichenau (Gn7).

Die Elementverteilung über die Tiefe des Kerns Gn5 zeigt eine Anreicherung der für Silikate typischen Elemente SiO_2 , Al_2O_3 , Ni und V in den Kalkmudden bzw. in den dunkleren Kernabschnitten (Abbildung 31). (Von den Proben 519,5 und 544 war kein ausreichendes Probenmaterial für eine Spurenelementanalyse vorhanden.)

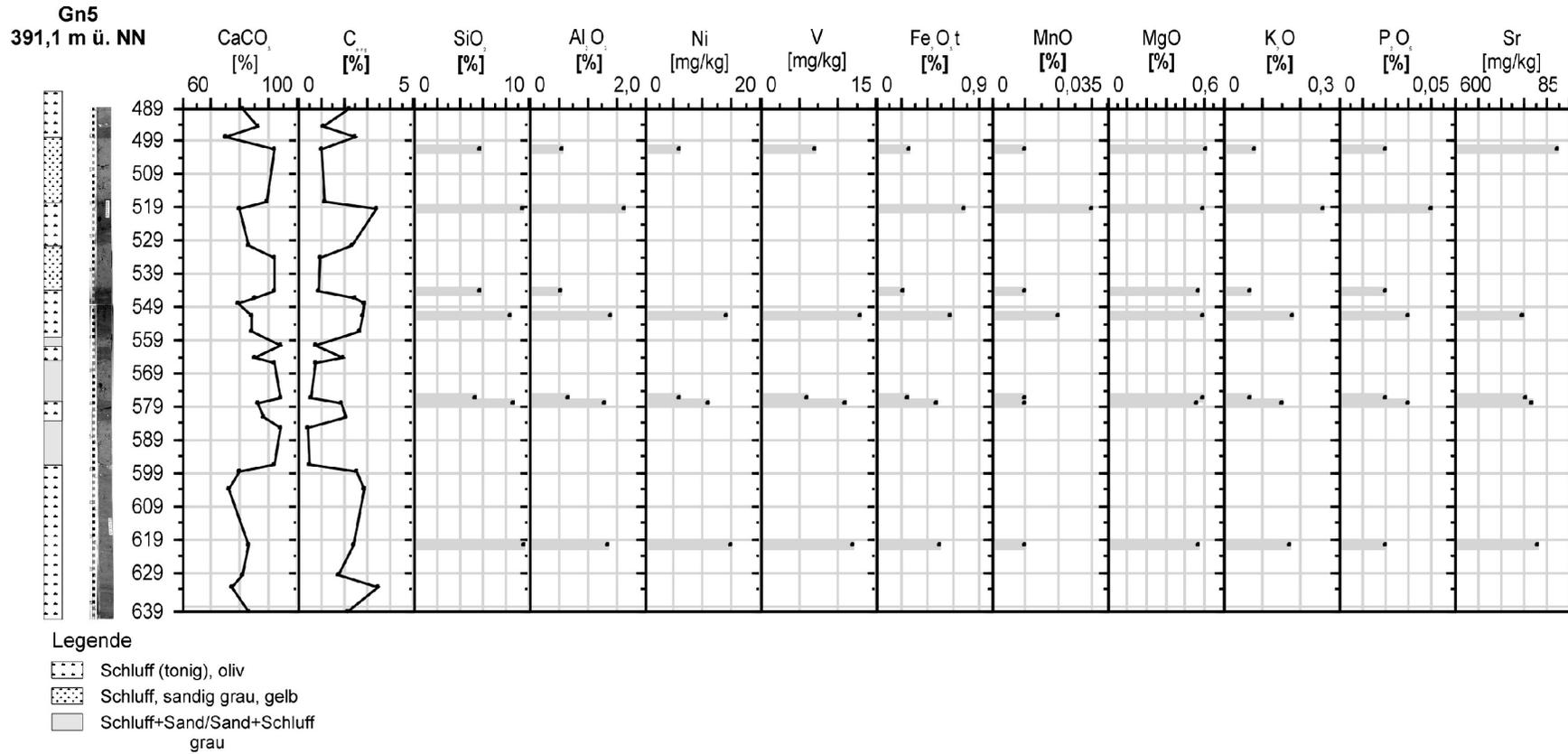


Abbildung 31: Stratigraphie und Verteilung ausgewählter Elemente in Bohrkern Gn5. Tiefenangaben cm u. GOK.

Erhöhte Konzentrationen von K_2O und P_2O_5 liegen immer im Zusammenhang mit erhöhten Silikatgehalten vor, sind demnach nicht als anthropogener Nährstoffeintrag zu interpretieren. Ebenso wenig liegen erhöhte Schwermetallkonzentrationen vor, die anthropogenen Eintrag anzeigen könnten.

Auffällig sind die Proben 576,5 und 578. Sie weisen einen ähnlichen Sr-Gehalt auf, obwohl sie einen unterschiedlichen $CaCO_3$ -Gehalt zeigen (Kopräzipitation des Sr im $CaCO_3$!). Das Sr/Ca-Verhältnis liegt jedoch mit 0,95 bzw. 1,04 im Bereich des von Blau-Grün-Algen gebildeten Calcits (Durchschnitt 1,06; MÜLLER 1968).

Auf die unterschiedlichen Elementkonzentrationen in der Kalkmudde und der Seekreide wird in Kapitel 2.5.3 eingegangen.

Gn6

Die mittleren Karbonatgehalte und Gehalte an organischer Substanz von Seekreide und Mudde des Kerns Gn6 liegen im Durchschnitt der anderen Kerne aus dem Gnadensee (Tabelle 11). Die Konzentrationskurven der beiden Komponenten zeigen im Kernverlauf wieder die typische Verteilung in Bezug auf die Sedimentfarbe: Helle Kernabschnitte weisen hohe Karbonat- und niedrige C_{org} -Gehalte auf, bei dunkleren Abschnitten verhält es sich umgekehrt (Abbildung 32, Punkte markieren jeweils die Probenunterkante, Probenmächtigkeit meist 2 cm). Die Grenzen zum Liegenden der dunkleren Schichten im Kernbereich 350-375 cm (s. Kernfoto Abbildung 32) sind fließend. Sie werden wegen des Probenabstandes im geochemischen Profil nicht erfasst.

Im Folgenden werden geochemisch auffällige Proben bzw. Schichten beschrieben.

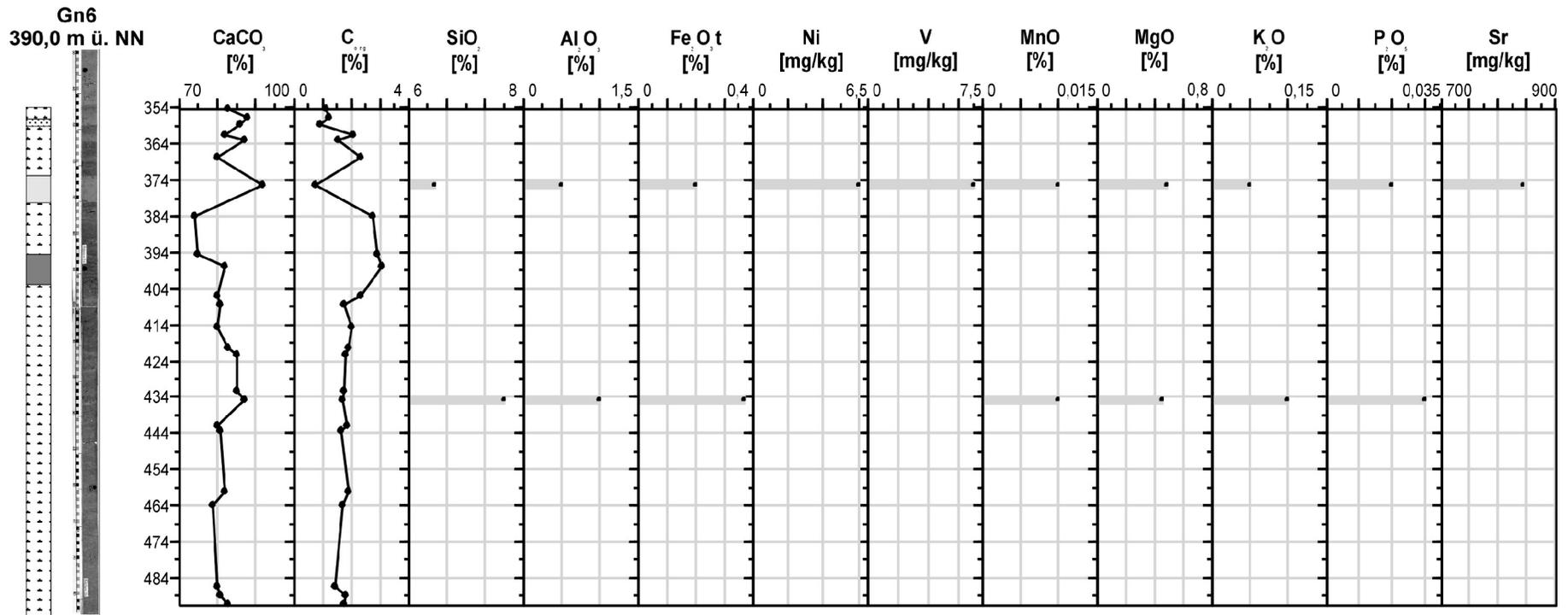
Ähnlich wie in Gn4 fällt hier die Schicht um die Probe 435, die optisch als Kalkmudde angesprochen wurde, aufgrund ihres $CaCO_3$ -Gehaltes in das Feld der Seekreiden.

Im Kernabschnitt 445-490 cm verlaufen die Konzentrationen von $CaCO_3$ - und C_{org} weitgehend parallel. Da im restlichen Kern die Parameter negativ miteinander korrelieren, muss man für den Abschnitt 445-490 cm geänderte Sedimentationsbedingungen annehmen. Des Weiteren ist von einer oder mehreren Komponenten auszugehen, die negativ mit dem Karbonatgehalt und dem

Gehalt an organischer Substanz korrelieren. In diesem Zusammenhang wären weitere Untersuchungen wünschenswert.

In Kern Gn6 wurden die Haupt- und Spurenelemente einer Probe aus einer Seekreideschicht und einer Probe aus der optisch als Kalkmudde angesprochenen Schicht (s.o.) analysiert. Probe 435 („Kalkmudde“) umfasste nicht ausreichend Material für die Spurenelementanalyse. Ziel war wie bei Kern Gn4 die Charakterisierung und der Vergleich der beiden Sedimenttypen, sowie der Nachweis eines geochemischen „Fingerabdrucks“, der eine Korrelation mit den entsprechenden Schichten der anderen Kerne ermöglicht. Analog zu Gn4 war letzteres nicht möglich.

Die Hauptelemente in Gn6 zeigen ebenfalls eine leichte Anreicherung der für Silikate typischen Elemente in der als Kalkmudde angesprochenen Schicht (Abbildung 32). K_2O und P_2O_5 sind dort ebenfalls angereichert. Deshalb sind sie wahrscheinlich zu grossen Teilen in den Silikaten eingebaut.



Legende

- Schluff (tonig), oliv
- Schluff, sandig grau, gelb
- Schluff+Sand/Sand+Schluff grau
- Schluff+Sand/Sand+Schluff oliv

Abbildung 32: Stratigraphie und Verteilung ausgewählter Elemente in Bohrkern Gn6. Tiefenangaben cm u. GOK.

Gn7

Die Konzentration der organischen Substanz in den Kalkmuddeschichten von Gn7 ist im Vergleich mit den anderen Gnadenseekernen niedrig (Tabelle 10), die CaCO_3 -Konzentrationen sind vergleichsweise hoch.

Die Seekreideschichten in Gn7 weisen einen durchschnittlichen Gehalt an organischer Substanz und den, im Vergleich mit den anderen Bohrkernen, niedrigsten Gehalt an CaCO_3 auf (Tabelle 10). Die Standardabweichung von nur 1,2 (Tabelle 10) erfasst mathematisch die über weite Kernstrecken bereits optisch zu erkennende Homogenität dieses Parameters (Abbildung 33).

Da die Kalkmuddeschichten einen hohen, die Seekreideschichten einen niedrigen Karbonatgehalt besitzen, ist die gesamte Variabilität des CaCO_3 -Gehaltes in Gn7 gering. Die beiden Sedimenttypen sind in Bezug auf den Karbonatgehalt ähnlich, der durchschnittliche Gehalt an organischer Substanz ist in beiden gleich. Damit zeigt sich, dass durch den Grenzwert von $\text{CaCO}_3 = 85\%$, der Seekreide von Kalkmudde trennt, in Gn7 keine Faziesunterschiede oder Unterschiede im Sedimentationsgeschehen charakterisiert werden können.

Die negative Korrelation von Karbonatgehalt und C_{org} bzw. organische Substanz im Kernverlauf, wie sie in den vorher beschriebenen Kernen vorhanden ist, kann in Gn7 nicht belegt werden (Abbildung 33). Die Proben mit den niedrigsten C_{org} -Werten weisen CaCO_3 -Gehalte zwischen 80% und 86% auf. Der niedrige C_{org} -Gehalt ist also nicht an hohe Karbonatgehalte gebunden. Trotzdem sind optisch in den meisten Proben (z.B. 442,5; 451; 453; 487,5; 515; 550) mit geringem C_{org} -Gehalt (<0,75%) helle Laminae im beprobten Kernbereich zu erkennen (Ausnahmen: 440,5; 471).

Da CaCO_3 und C_{org} sich nicht komplementär zueinander verhalten, kann ihre Gesamtsumme nicht 100% ergeben. Es muss daher mindestens eine dritte sedimentbildende Komponente geben. Dies sind SiO_2 , Al_2O_3 sowie die weiteren Haupt- und Spurenelemente (Abbildung 33). Die Summe der Gehalte aller Komponenten (mit unterschiedlichen Methoden bestimmt) beträgt $100\pm 2\%$, ist also im Rahmen der Messfehler richtig und vollständig.

Daraus kann unmittelbar geschlossen werden, dass erhöhte SiO_2 - und Al_2O_3 -Konzentrationen nicht wie in den anderen Kernen an erhöhte C_{org} -Konzentrationen gebunden sind.

Außer Sr und P_2O_5 zeigen alle anderen Elemente (Fe_2O_3 , MnO, MgO und K_2O) vergleichbare Konzentrationsänderungen wie SiO_2 und Al_2O_3 (Abbildung 33).

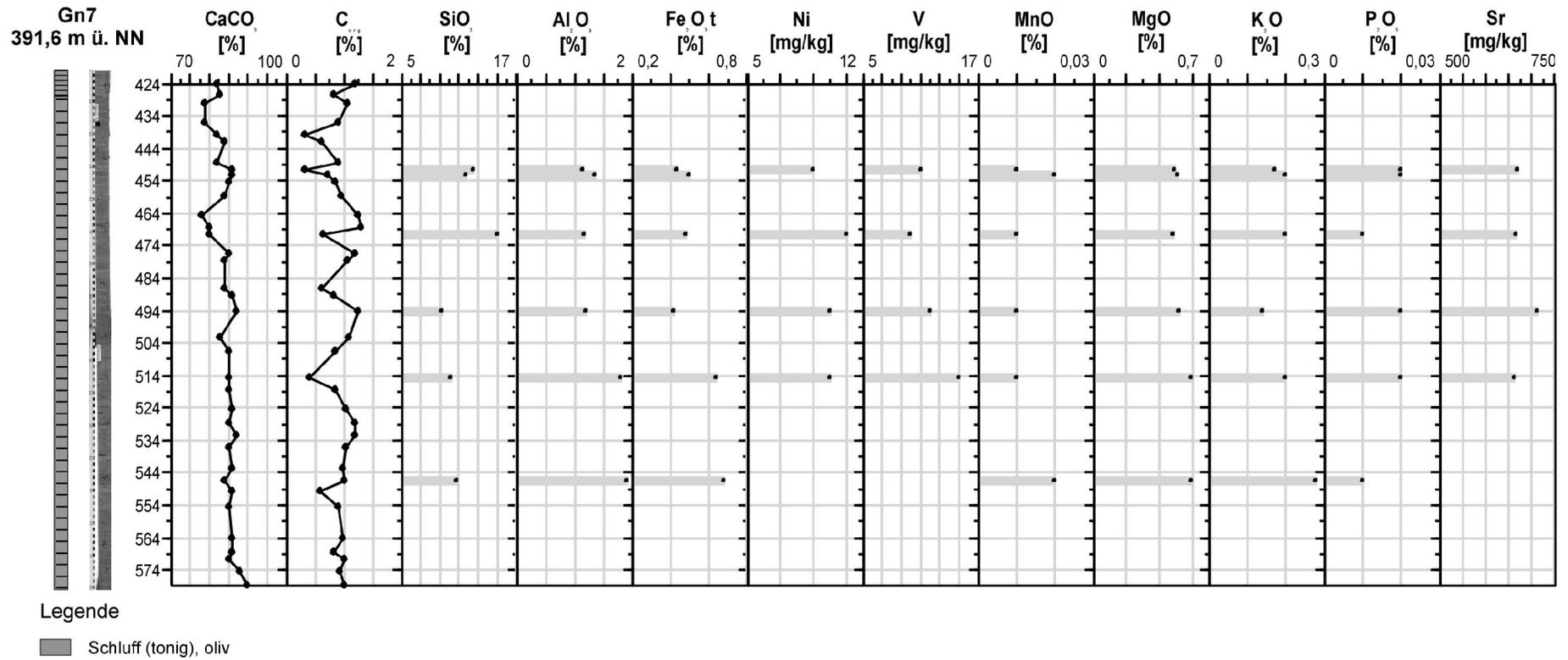


Abbildung 33: Stratigraphie und Verteilung ausgewählter Elemente in Bohrkern Gn7. Tiefenangaben cm u. GOK.

Die Sr-Konzentrationen zeigen geringe Variationen über den Kernverlauf. Diese Variationen folgen den Konzentrationen des CaCO_3 . Interessant ist, dass die Ni- und V-Gehalte in Gn7 nicht parallel zueinander verlaufen. Hier muss an eine Elementverlagerung oder an Messfehler gedacht werden.

Beim Vergleich der Durchschnittsgehalte des Kerns Gn7 mit dem jeweiligen Mittelwert aus den Kernen Gn4-6 (Markelfinger Winkel), fällt die Anreicherung der aus den Silikaten stammenden Elemente in den Seekreiden des Kerns Gn7 auf (Abbildung 34). In den Kalkmudden von Gn7 sind diese Elemente nur wenig oder nicht angereichert bzw. wie im Falle der Elemente Ni, Cu und Zn sogar abgereichert. Die im Vergleich zu den Sedimenten aus dem Markelfinger Winkel sowohl in der Kalkmudde als auch in der Seekreide des Kerns Gn7 angereicherten Elemente können durch den höheren Silikatanteil in Gn7 erklärt werden. Die stärkere Anreicherung in der Seekreide gegenüber der Kalkmudde ist durch den niedrigeren durchschnittlichen Karbonatgehalt in Gn7 zu erklären: der Silikatanteil ist in der Kalkmudde der Kerne Gn4-6 wesentlich höher als in deren Seekreide; in Gn7 ist der Unterschied zwischen beiden Sedimenttypen nicht so stark ausgeprägt.

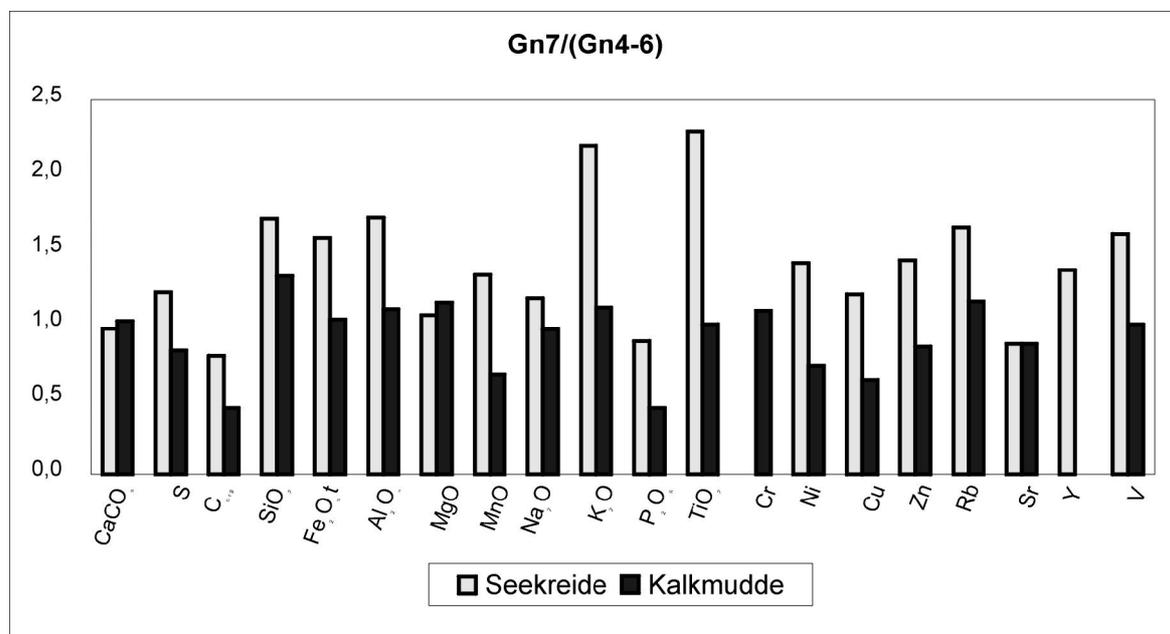


Abbildung 34: An- (>1) bzw. Abreicherung (<1) verschiedener Elemente im Kern Gn7 gegenüber den Durchschnittswerten der Kerne aus dem Markelfinger Winkel.

Der geringere Gehalt an P_2O_5 in Gn7 ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass zumindest ein Teil des P_2O_5 aus organischer Substanz stammt, da auch diese gegenüber den Kernen aus dem Markelfinger Winkel abgereichert ist (Abbildung 34).

Das Sr/Ca-Verhältnis ist mit 0,94 (Sr/Ca*1000) gegenüber Gn4-6 (1,02) geringfügig niedriger, aber immer noch in dem Bereich des von Blau-Grün-Algen gebildeten Calcits (Durchschnitt 1,06; MÜLLER 1968).

2.5.3 Diskussion und Zusammenfassung

In diesem Abschnitt sollen zunächst die Unterschiede zwischen den Kernen NBS L2 und W4 und dem Kern Nu8 erörtert werden, dann werden die Durchschnittskonzentrationen der einzelnen Kerne beider Seen miteinander verglichen. Anschließend werden Elementverhältnisse in den einzelnen Kernen diskutiert. Vor einer Zusammenfassung des Kapitels, werden die Ergebnisse in Bezug auf anthropogene Einflüsse auf die Sedimente und den terrigenen Eintrag in die Seen besprochen.

Die von RÖSCH 1983 an dem Bohrkern Nu 8 aus dem Zentrum des Ostbeckens des Nussbaumer Sees ermittelten Schwermetallgehalte liegen in der Zeit vor Beginn des Frühmittelalters alle um Zehnerpotenzen niedriger als die in den Bohrkernen NBS L2 und W4 gemessenen Konzentrationen (Tabelle 9) und wurden von RÖSCH 1983 als Background angenommen. Der aus dem Kalkgehalt von Nu 8 errechnete CaO-Gehalt entspricht dem in NBS W4 bzw. dem der Kalkmudden in NBS L2. Die großen Unterschiede der Schwermetallgehalte (inkl. Fe_2O_3) könnten durch unterschiedliche Aufschlußmethoden (in RÖSCH 1983 nicht genannt) erklärt werden: in der hier vorliegenden Arbeit wurden sowohl Silikate als auch Karbonate erfasst, bei RÖSCH 1983 wurde möglicherweise eine Salzsäureextraktion durchgeführt, bei der die Silikate (die die Schwermetalle enthalten) nicht quantitativ erfasst werden. Die Karbonate hingegen werden mit einer Salzsäureextraktion vollständig aufgeschlossen (WESSELS 1995). Der ermittelte Karbonatgehalt beider Aufschlussverfahren sollte, wie auch tatsächlich der Fall, gleich sein. Unklar bleibt der Unterschied in den Fe_2O_3 -Konzentrationen: Eisenoxide und -hydroxide werden nach WESSELS 1995 auch mit einer Salzsäureextraktion vollständig erfasst. Demnach sollten die

Ergebnisse der Eisenbestimmung von RÖSCH 1983 mit den hier vorliegenden Resultaten übereinstimmen.

Im Folgenden werden die einzelnen Kerne beider Seen verglichen. Die Mittelwerte der Elementgehalte werden in jedem Kern nach dem Sedimenttyp unterschieden, da die Gehalte in Kalkmudde und Seekreide generell unterschiedlich sind.

Bei den Kalkmudden unterscheiden sich beide Seen vor allem im Bezug auf den CaCO_3 - und den C_{org} -Gehalt: die Kalkmudden des Nussbaumer Sees enthalten rund 10% weniger CaCO_3 und 5-8% mehr C_{org} als eine Kalkmudde aus dem Gnadensee. Diese Unterschiede können wahrscheinlich auf die Größenunterschiede der Seen zurückgeführt werden: In einem großen See ist den Eintrag an terrestrischem, organischem Kohlenstoff geringer, da das Ufer weiter von den Probenahmelokalitäten entfernt ist. In der breiten Flachwasserzone des Gnadensees ist generell von einer höheren Karbonatproduktion auszugehen als im kleinen Nussbaumer See mit einer um mindestens das 10fache schmalere Flachwasserzone. Schlechte Bedingungen für Karbonatbildung, wie z. B. hypereutrophes Wasser, stellen sich an einem kleinen See eher ein als an einem größeren See. In diesem Zusammenhang sind die MgO-Konzentrationen (mögliche Kopräzipitate des Calcits) zu nennen, die in den Sedimenten des Nussbaumer Sees ebenfalls höher sind (0,01-0,6%,

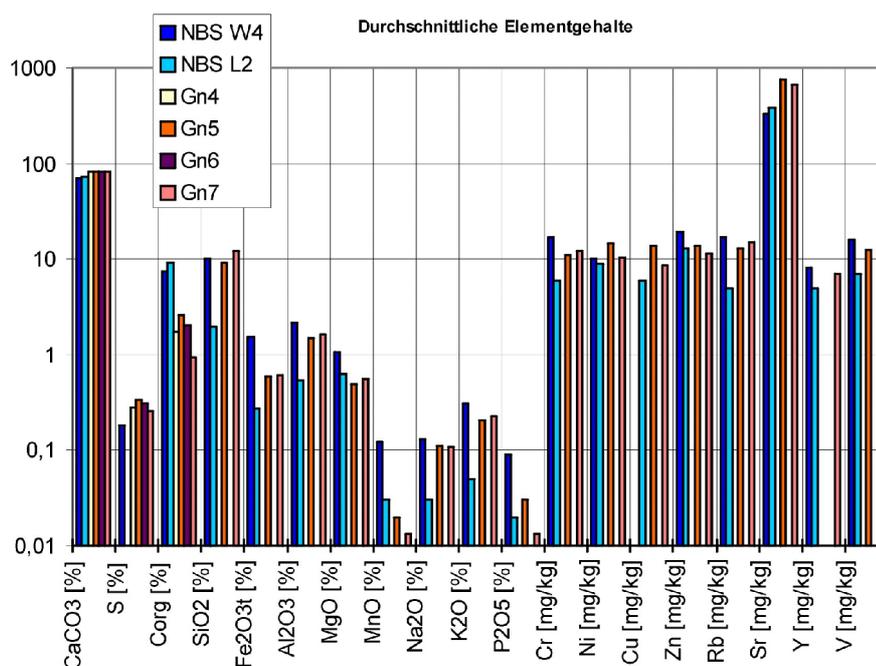


Abbildung 35: Vergleich der durchschnittlichen Elementgehalte in den Kalkmudden der verschiedenen Kerne. Die y-Achse ist logarithmisch skaliert.

Abbildung 35) als im Gnadensee. Da die Gehalte jedoch in NBS W4 am höchsten sind, der die niedrigsten CaCO_3 -Konzentrationen aufweist, ist hier nicht Kopräzipitation die Quelle des MgO . Es muss ursächlich eine andere Quelle angenommen werden, möglicherweise Silikate.

MnO ist in den Kernen aus dem Nussbaumer See erhöht, eine Erklärung hierfür ist nicht bekannt. Die Sr-Gehalte sind wie erwartet in den Sedimenten des Gnadensees höher als in denen des Nussbaumer Sees (Abbildung 35), da der erhöhte Sr-Gehalt des Alpenrheins sich durch die biogene Entkalkung auf die Sedimente „durchpaust“ (MÜLLER 1969).

Der S-Gehalt des Kerns NBS W4 ist geringfügig niedriger als bei Kalkmudden aus dem Gnadensee (Abbildung 35). Der Kern NBS L2 kann nicht zum direkten Vergleich herangezogen werden, da S nur an der Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ bestimmt wurde.

Nicht eindeutig zu erklären sind die im Nussbaumer See niedrigeren Ni- und Cu-Konzentrationen. Bei allen anderen Elementen weist der Kern NBS W4 höhere Konzentrationen als die Kerne aus dem Gnadensee auf, der Kern NBS L2 dagegen niedrigere (Abbildung 35). Dies zeigt, dass die Gehalte dieser Elemente nicht vom See abhängig sind, sondern vom Silikatgehalt der Sedimente (siehe SiO_2 - und Al_2O_3 -Konzentrationen bzw. deren Quotient in Abbildung 37).

Im Nussbaumer See scheint der Silikatgehalt von der jeweiligen Fazies abzuhängen: nicht die unterschiedlichen Sedimente eines Kerns zeigen einen charakteristischen Si/Al-Quotienten, sondern die beiden Kerne NBS L2 und W4 (Abbildung 37). Diese beiden Kerne sind exemplarisch für verschieden Faziesbereich im Nussbaumer See. Im Gnadensee weisen die unterschiedlichen Sedimente eines Kerns charakteristische Si/Al-Quotienten auf. Dies deutet auf Faziesänderungen im betrachteten Sedimentationszeitraum hin.

Bei den Seekreiden zeigt sich, bis auf den Karbonatgehalt das gleiche Bild wie bei den Kalkmudden: Die Karbonatgehalte der Kerne sind alle ähnlich (Abbildung 36). In Zeiten „optimaler“ Karbonatproduktion scheint die Seegrösse auf die Produktivität keinen Einfluss zu haben.

C_{org} - und MnO -Konzentrationen sind in Kern NBS L2 höher als in den Gnadenseekernen (NBS W4 weist keine Seekreide auf). Der Grund für die unterschiedlichen MnO -Konzentration ist nicht bekannt. Wie bei den Kalkmudden beider Seen kann der unterschiedliche C_{org} -Gehalt durch die unterschiedliche Größe der Seen erklärt werden.

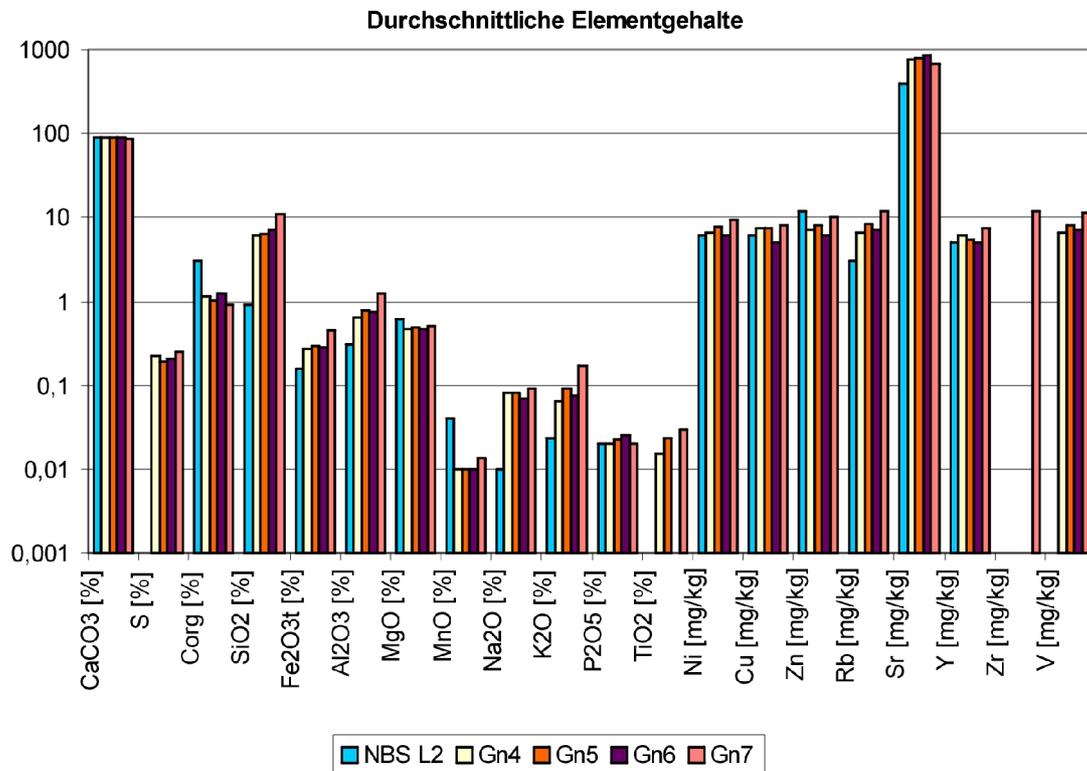


Abbildung 36: Vergleich der durchschnittlichen Elementgehalte in den Seekreiden der verschiedenen Kerne. Die y-Achse ist logarithmisch skaliert.

Die aus Silikaten stammenden Elemente sind in den Seekreiden des Gnadensees höher konzentriert als in denen des Nussbaumer Sees. Hier hat wiederum die Größe des Sees einen Einfluss auf die Sedimentation: NBS L2 repräsentiert Sedimente aus einer Buchtsituation eines kleinen Sees. Damit sind dort ruhige Sedimentationsbedingungen gegeben und Einflüsse von außen zu vernachlässigen. Der Gnadensee bietet allein durch seine Größe mehr Windexposition, die wahrscheinlich zu einer Verteilung der allochthon eingebrachten Stoffe (aus dem Mühlbach in Markelfingen und möglicher Erosion im Ufer- und Flachwasserbereich) führt.

Für die Sr- und die Schwermetallgehalte (Ni, Cu, Zn, V, des weiteren Rb und Y) gilt das bereits für die Kalkmudden gesagte: der Kern NBS W4 weist höhere Schwermetallkonzentrationen als die Kerne aus dem Gnadensee auf, der Kern NBS L2 dagegen niedrigere. Der Sr-Gehalt ist in den Kernen aus dem Gnadensee höher.

Auffällig ist der hohe Zn-Wert der Seekreiden aus NBS L2 und die hohen Konzentrationen von Ni, Cu, Zn, V, Rb und Y in Kern Gn7 (Abbildung 36). Diese erhöhten Konzentrationen sind mit dem vergleichsweise hohen Silikatgehalt des Kerns zu erklären. Der leicht erhöhte Zn-Wert in NBS L2 kann nicht eindeutig geklärt werden. Ein anthropogener Einfluß ist unwahrscheinlich, da während der Bronze- und Eisenzeit Zn noch kein anthropogen genutztes Material war.

Die P_2O_5 - und MgO-Gehalte sind in allen Kernen ähnlich.

Es folgt die Besprechung der Elementverhältnissen:

Das Fe/S-Verhältnis ist bis auf die Proben Gn7 515 und 547 immer $< 0,87$ (Fe/S-Verhältnis des Pyrit). Gn7 515 und 547 liegen mit 1,04 bzw. 0,95 über dem für Pyrit typischen Verhältnis. Die Fe/S-Verhältnisse in Kern NBS W4 liegen ebenfalls mit 2,1-11,9 weit über dem des Pyrits. Somit ist eine Fixierung des Fe als Pyrit selten der Fall. Bei einem Verhältnis $< 0,87$ liegt ein „Überschuss“ an S vor, der durch S in der organischen Substanz oder in anderen Sulfiden erklärt werden kann (EUSTERHUES 2000). Ein Überschuss an Fe bezüglich des Pyrits ($Fe/S > 0,87$) deutet auf eine Bindung des Fe als Hydroxid oder eine Herkunft des Eisens aus Silikaten hin (EUSTERHUES 2000). Nicht auszuschließen ist für den Kern NBS W4 eine Kontamination bei der Probenahme.

Veränderungen des Si/Al-Quotienten über die Kerntiefe lassen nichtsilikatische Si-Quellen (Diatomeen, aber auch Quarz) vermuten (Abbildung 37). Für die Kerne Gn5 und Gn7 wurde als Kontrolle des Si/Al-Verhältnisses noch der Si/Ti-Quotient aufgetragen (TiO_2 wurde aus messtechnischen Gründen an den Kernen des Nussbaumer Sees nicht bestimmt). Beide Quotienten zeigen eine gute Korrelation (Abbildung 37), d.h. Al kann wie Ti als konservatives, aus Silikaten stammendes Element betrachtet werden.

Vergleicht man die Kerne untereinander, so hat NBS L2 mit seinem niedrigen Si/Al-Quotienten eine Sonderstellung (zum Vergleich: Si/Al=5,5 in marinen Karbonaten, 3,3 in Tongesteinen nach TUREKIAN & WEDEPOHL 1961): Dieses niedrige Si/Al-Verhältnis weist darauf hin, dass Diatomeen, wenn überhaupt, nur untergeordnet am SiO_2 -Gehalt beteiligt sind. Ähnliches gilt auch für den Kern NBS W4, der etwas höhere Si/Al-Quotienten besitzt.

Auch in den Kernen Gn5 und Gn7, in denen Diatomeen optisch nachgewiesen wurden (s. Kap. 2.4.3), ist die Anwesenheit von Diatomeen nicht durch ein eindeutig höheres Si/Al-Verhältnis zu erkennen. Höhere Verhältnisse sind nicht an hohe SiO₂-Konzentrationen gekoppelt, wie dies zu erwarten wäre. In Gn5 treten hohe SiO₂-Konzentrationen zusammen mit niedrigen Si/Al-Verhältnissen auf. Auf die Gesamtmenge des SiO₂ im Sediment haben die Diatomeen demnach keinen Einfluß.

Es soll nun der terrestrischen Eintrag, angezeigt durch ein niedriges Ca/Al-Verhältnis (Abbildung 37) betrachtet werden. Um mit absoluter Sicherheit von einem erhöhten Eintrag allochthonen Materials in bestimmten Kernabschnitten reden zu können, muss die Sedimentationsrate bzw. Sedimentakkumulationsrate der betreffenden Schichten mit den angrenzenden Kernbereichen identisch sein. Aufgrund der nur groben Datierung der Bohrkerne aus dem Gnadensee kann die Sedimentationsrate jedoch nicht für einzelne vergleichsweise geringmächtige Straten berechnet werden. Bei der Bestimmung des allochthonen Eintrags bleibt deshalb ein Unsicherheitsfaktor. Die Übereinstimmung verschiedener Methoden zur Rekonstruktion des allochthonen Inputs stützen die Ergebnisse jedoch sehr gut ab.

Im Vergleich zu den anderen Kernen zeigt sich für NBS L2 der insgesamt geringe terrestrische Einfluss anhand des hohen Ca/Al-Verhältnisses.

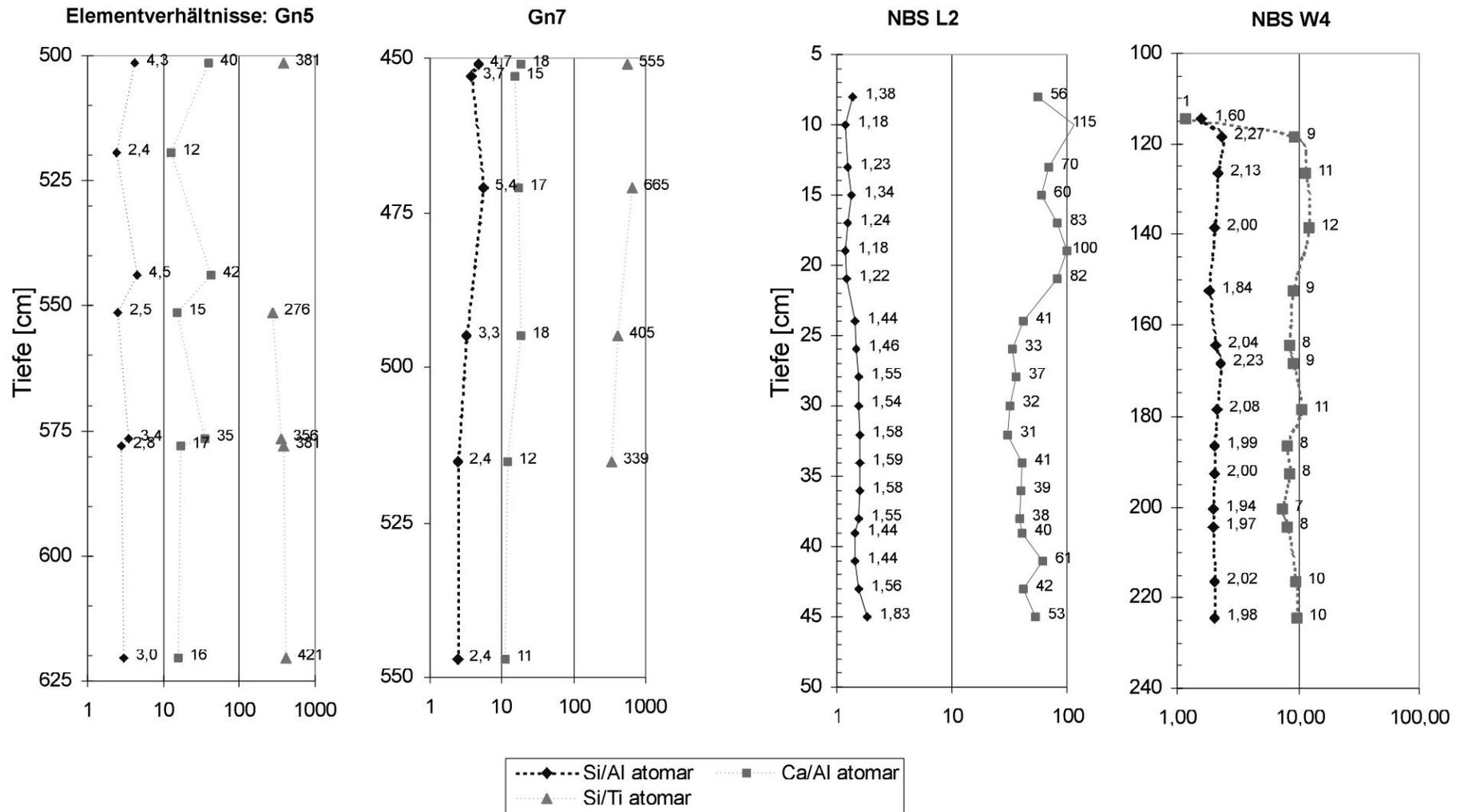


Abbildung 37: Elementverhältnisse in den Bohrkernen Gn5, Gn7 NBS L2 und NBS W4. Die X-Achse ist logarithmisch skaliert. Neben den einzelnen Probestellen ist zum besseren Vergleich der Diagramme der jeweilige Quotient angeschrieben.

Um die Kerne miteinander vergleichen zu können, wurden die Bereiche mit niedrigem Ca/Al-Verhältnis aus Abbildung 37 gegen die Zeit aufgetragen (Abbildung 38). Zur Datierung wurden die in Kapitel 2.2 beschriebenen Altersmodelle verwendet. Ein Kern ist jeweils durch eine höhere und eine niedrigere Linie repräsentiert. Erstere stellt die Phase des stärksten Eintrags (=niedrigstes Ca/Al-Verhältnis), letztere Phasen schwächerer Allochthonzufuhr dar. Bei Gn5 und Gn7 ist zu beachten, dass die Resultate jeweils nur auf ein oder zwei Proben basieren, die auf die optisch oder durch CaCO_3 - bzw. C_{org} -Gehalt abgrenzbaren Schichten extrapoliert wurden. Die resultierenden Ergebnisse dieser beiden Kerne können deshalb nicht mehr als eine erste These sein, die es noch zu verifizieren gilt.

Zunächst zum Nussbaumer See: Der Zeitbereich, der in NBS W4 und NBS L2 untersucht wurde, ist nicht identisch, d.h. in NBS W4 wurden die Sedimente jünger als 2500 BP cal, in NBS L2 die älter 3100 BP cal nicht erfasst. Im überlappenden Bereich stimmen die Phasen erhöhter allochthoner Zufuhr gut überein. Kleinere Verschiebungen dieser Phasen zueinander können Datierungsunschärfen oder auch den unterschiedlichen Faziesbereich der beiden Kerne widerspiegeln. Der in NBS L2 stärkste allochthone Eintrag zwischen 2700 und 2800 BP cal ist auch in NBS W4 zu erkennen. Für den Zeitraum zwischen 2700 und 2550 BP cal ist in NBS W4 allerdings kein Eintrag silikatischen Materials zu verzeichnen. Wahrscheinlich ist durch die Position von NBS L2 näher zum Ufer und/oder durch die geringere Wassertiefe eine länger

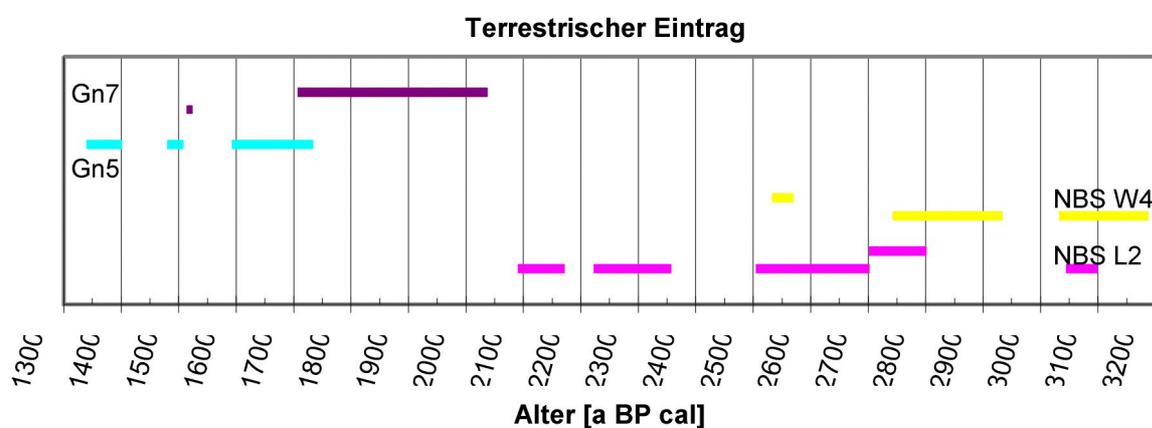


Abbildung 38: Anhand des Ca/Al-Verhältnisses rekonstruierter terrestrischer Eintrag. Weitere Erläuterungen siehe Text.

dauerende allochthone Zufuhr möglich gewesen. Da der silikatische Anteil in NBS L2 generell sehr niedrig ist, könnte sich in diesem Zeitraum zwischen 2700 und 2550 BP cal auch ein lokal sehr begrenztes Ereignis zeigen.

Die in Gn5 und Gn7 untersuchten Bereiche decken sich ebenfalls nicht vollständig (s. Tabelle 3). Beide weisen einen allochthonen Eintrag um 1500 BP cal auf (Abbildung 38). Die Zufuhrphase um 1600 in Gn5 ist so nicht in Gn7 zu finden. Möglicherweise ist die Datierung in Gn5 hier nicht korrekt (die Datierung von Gn7 erscheint wegen der ruhigeren Sedimentationsverhältnisse glaubwürdiger) und diese Phase entspricht der in Gn7 zwischen 1750 und 1930 BP cal gefundenen (evtl. zu extrapolieren bis 2030 BP cal). Dies erscheint vor allem dann logisch, wenn man die Phase um 1600 BP cal in Gn5 bis über die Probe 620,5, d.h. 1730 BP cal ausdehnen würde. Die Befunde der letztgenannten Probe stützen diese Annahme, weitere Proben müssten die These jedoch untermauern.

Folgendes lässt sich zusammenfassen:

Elementunterschiede zwischen den Kernen eines Sees sind lage- bzw. faziesbedingt. Sedimente mit höherem Gehalt an organischer Substanz zeigen häufig, aber nicht immer, erhöhte Gehalte der für Silikate typischen Elemente (s. Beginn Kapitel 2.5.3).

Die Sr-Gehalte der Sedimente des Nussbaumer Sees sind wesentlich geringer als die der Sedimente aus dem Gnadensee. Die Kalkmudden des Nussbaumer Sees haben einen niedrigeren Karbonat- und einen höheren C_{org} -Gehalt. Die Seekreiden unterscheiden sich im Karbonatgehalt nicht. Ihr Gehalt an organischer Substanz ist im Nussbaumer See höher. Alle anderen Elemente haben keine für nur einen See typischen Konzentrationen. Ihre Gehalte werden in erster Linie vom Silikatgehalt der Sedimente bestimmt.

Hinweise auf anthropogene Sedimentbeeinflussung in Form erhöhter P_2O_5 , K_2O und Na_2O -Gehalte sind nicht zu finden. Ebenso wenig treten erhöhte Schwermetallgehalte auf, die auf anthropogene Aktivität hindeuten würden.

Es konnte terrigener Eintrag in beide Seen anhand des Ca/Al-Verhältnisses belegt werden (Abbildung 38).

3 Diskussion

3.1 Anthropogene Einflüsse

Hier sollen zunächst die theoretisch möglichen anthropogenen Einflussfaktoren auf die Sedimentation besprochen werden. Anschließend wird auf die in den hier untersuchten Sedimenten vorhandenen Indizien, die auf den Menschen schließen lassen, eingegangen.

3.1.1 Theoretischer Hintergrund

Der Mensch kann den See direkt durch den Eintrag von Fäkalien, Abfällen und Schwermetallen beeinflussen. Fäkalien und Abfälle werden zunächst abgebaut, der See wird im Laufe der Zeit eutropher.

Eutrophe Verhältnisse werden im Sediment meist mit Schichten mit erhöhtem organischen Gehalt in Zusammenhang gebracht (BEHBEHANI et al. 1986, EUSTERHUES 2000). Eine Ausnahme stellt der Fall dar, in dem durch hohe Dekompositionsraten hohe CO₂-Konzentrationen entstehen. Diese oder im Sediment gebildete organische Säuren können eine Rücklösung des Calcits bewirken (EUSTERHUES 2000). Damit wäre der hohe organische Gehalt solcher Schichten auf den fehlenden Karbonatgehalt und nicht nur auf eine Eutrophierung zurückzuführen. Schichten, die fast ausschließlich aus organischem Material bestehen, können während eines niedrigen Seespiegels in Ufernähe oder am Ufer entstanden sein (PAZDUR et al. 1994). Verstärkte Produktivität, d.h. erhöhte "Produktion" organischer Substanz, eines Sees kann nicht nur mit erhöhter Nährstoffzufuhr, sondern auch durch klimatische Faktoren, z.B. gestiegene Temperaturen, erklärt werden (LEHMANN & MICHLER 1985, ROBINSON et al. 1993). Auch eine bessere Erhaltung des organischen Materials durch anoxische Bedingungen kann einen höheren Gehalt an organischer Substanz hervorrufen (ROBINSON et al. 1993). Somit ist ein Anstieg des organischen Gehaltes im Sediment nicht zwingend auf eine Beeinflussung der Sedimentation durch den Menschen zurückzuführen. Eine Unterscheidung von anthropogenen und klimatischen Ursachen, wie von REIN & NEGENDANK (1993) durchgeführt, ist hier wegen fehlender Sedimentationsraten nicht möglich.

Ein erhöhter Phosphorgehalt im Sediment zeigt ebenfalls eine Eutrophierung an (BEHBHANI et al. 1986). Gleiches sollte für die Nährstoffe K und Na gelten. Dass diese drei Elemente in der vorliegenden Arbeit überwiegend aus Silikaten stammen, wurde bereits im Kapitel 2.5 diskutiert.

Erhöhte Schwermetallgehalte in den Sedimenten sind ein weiterer direkter Nachweis auf menschliche Tätigkeit (EUSTERHUES 2000, LEHMANN & MICHLER 1985, MATSCHULLAT et al. 1997).

Ein indirekter Hinweis auf anthropogene Tätigkeiten kann ein erhöhter Eintrag an terrestrischem Material sein (REIN & NEGENDANK 1993). Dieses terrestrische Material kann zum einen aus klastischem Detritus bestehen, zum anderen aus organischen und/oder minerogenen Partikeln, an die Nährstoffe gebunden sind, die wiederum zu einer Eutrophierung des Sees führen können (s.o.). Vom Menschen werden Flächen z.B. für landwirtschaftliche Zwecke geöffnet, aus denen direkt Material durch Windtransport in den See gelangen kann. Eine geringere Vegetation führt zu einem höheren oberflächlichen Abfluss. Daraufhin kommt es zur Erosion der freigelegten Flächen und zu verstärkter Erosion durch die Fließgewässer, deren Wasserführung vor allem bei Starkregenereignissen zunimmt. So gelangt auf "indirektem" Weg terrigenes Material in den See. Mögliche Ursachen für natürliche Verstärkung des terrigenen Eintrags sind erhöhte Jahresniederschläge, Seespiegelbewegungen, katastrophale Ereignisse wie Hangrutschungen und starke Klimaveränderungen (z.B. Jüngere Dryas).

3.1.2 Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf anthropogene Sedimentbeeinflussung

Betrachtet man den Gehalt an organischer Substanz im Sediment, so könnte der Mensch während der in Abbildung 39 zusammengefassten Zeiten den See beeinflusst haben. Ein Bohrkern wird in der Abbildung durch eine höhere und eine niedrigere Linie repräsentiert. Erstere gibt einen stark erhöhten Gehalt, letztere einen erhöhten Gehalt an organischer Substanz an. Die angegebenen Zeiträumen basieren auf den in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Altersmodellen und wurden, wenn wahrscheinlich, extrapoliert.

Für den Nussbaumer See kann die in NBS W4 nachgewiesene verstärkte Produktivität des Sees für die Zeit um 2900 BP cal möglicherweise mit der Siedlungsphase von 2820-2750 BP cal

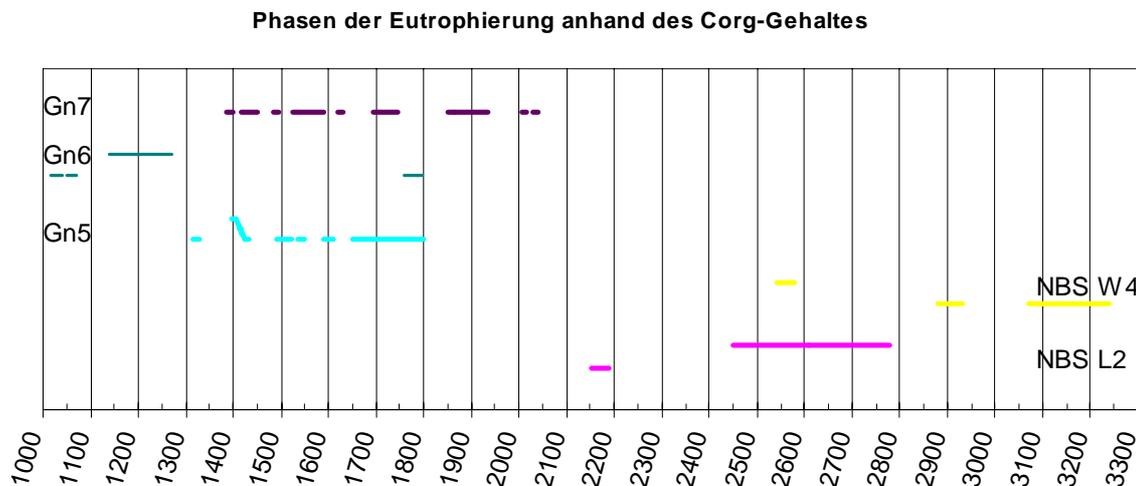


Abbildung 39: Phasen mit erhöhtem organischen Gehalt im Sediment. Weitere Erläuterungen siehe Text.

(GOLLNISCH-MOOS 1999) und die in beiden datierten Kernen erfasste erhöhte Produktivität um 2600 BP cal mit der Siedlungsphase 2613-2585 BP cal (GOLLNISCH-MOOS 1999) in Verbindung gebracht werden.

Die Differenz zwischen der Datierung der Siedlungsphase von 2820-2750 BP cal und der Datierung der Phase erhöhter Produktivität (2900 BP cal) kann durch die Ungenauigkeit der ^{14}C -Daten und deren Extrapolation für die Phase der erhöhten Produktivität erklärt werden.

Die erhöhte Produktivität um 3050-3250 BP cal in NBS W4 und um 2170 BP cal in NBS L2 kann mit keiner bekannten Siedlungstätigkeit korreliert werden. Für diese Phasen könnten entweder natürliche oder archäologisch nicht erfasste bzw. nicht erfassbare anthropogene Tätigkeiten die Ursache sein. Letzteres erscheint aufgrund der guten Untersuchung des Seebachtales unwahrscheinlich, deshalb sind hier natürliche Ursachen (z.B. bessere Erhaltung oder klimatische Veränderungen) für die verstärkte Sedimentation organischer Substanz anzunehmen.

Eine Parallelität des Verhaltens der organischen Substanz in den Kernen aus dem Gnadensee ist wegen Datierungsungenauigkeiten und der kurzen Zeitabständen zwischen den einzelnen Phasen erhöhter bzw. geringerer Produktivität nicht eindeutig zu erkennen. Nimmt man einen Fehler von ± 50 Jahren an (was bei den möglichen Hiaten als das Minimum erscheint), so können die meisten bzw. fast keine Phasen miteinander korreliert werden. Deshalb soll hier nur darauf hingewiesen werden, dass die in Gn5 und Gn7 um 1400 BP cal erfasste höhere Produktivität des Sees möglicherweise eine Folge der alemannischen Landnahme ist.

Eine Anreicherung von P sowie von Na und K in den Sedimenten des Nussbaumer Sees und des Bodensee-Gnadensees sind nicht zu erkennen. Dies kann entweder durch eine nur geringe Beeinflussung der Sedimente durch den Menschen oder durch die Mobilität der Elemente, vor allem des P (LUDWIG 2001), erklärt werden.

Erhöhte Schwermetallgehalte, deren Herkunft auf den Menschen und nicht auf silikatische Minerale zurückgeführt werden kann, konnten nicht nachgewiesen werden. Dies erklärt sich durch die in den Siedlungen durchgeführte, einfache Metallverarbeitung (Schmieden, Gießen) ohne Verhüttung, bei der nur geringe Mengen der Metalle in die Umwelt freigesetzt werden. Deren Niederschlag in den Seesedimenten wird durch die eigentliche Sedimentation weiter verdünnt, sodass ein Nachweis nicht mehr möglich ist.

Ein weiterer Hinweis auf anthropogenen Einfluss auf das Sediment könnten erhöhte Gehalte von Silikaten, Quarz und Dolomit durch allochthonen Eintrag sein (s. Kap. 3.1.1). Silikate werden durch die bereits genannten Elemente repräsentiert, Quarz und Dolomit werden direkt mit der röntgenographischen Untersuchung erfasst. In Abbildung 38 und 40 sind alle Phasen eines erhöhten Gehaltes dieser Komponenten aufgeführt, im Folgenden werden diese Resultate diskutiert. Die Ergebnisse der röntgenographischen Analyse wurden nur für den Zeitraum, den die Probe tatsächlich abdeckt, eingetragen. Die näher zusammen liegenden Proben der chemischen Analyse (s. Kap. 2.5.3) wurden, sofern möglich, für die jeweilige Schicht extrapoliert.

Unterschiede zwischen beiden Methoden gibt es in Kern NBS L2 zwischen den Ergebnissen für die Zeit um 2370 BP cal (Probe 17) und für die Zeit 2330 BP cal (Probe 15). Auffällige ist hier, dass die erhöhten Quarz- und Dolomitgehalte mit erhöhten Ni- und V-Werten einhergehen, während SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalte erst 30 Jahre später erhöht sind (s.a. Abbildung 21). Möglicherweise ist, wie in Kern NBS W4, ein erhöhter Quarz- und Dolomiteintrag eher festzustellen wie der Eintrag von Silikaten. Ni und V könnten frühdiagenetisch verlagert worden sein (s.a. Kap. 2.5.1).

In Kern NBS W4 stimmen die Anzeiger für allochthonen Eintrag aus der chemischen und röntgenographischen Untersuchung bis auf die Zeiten um 2620 BP cal (Probe 122) und 2720 BP cal (Probe 136) überein (zu beachten ist, dass die verschiedenen Analysen jeweils an benachbarten

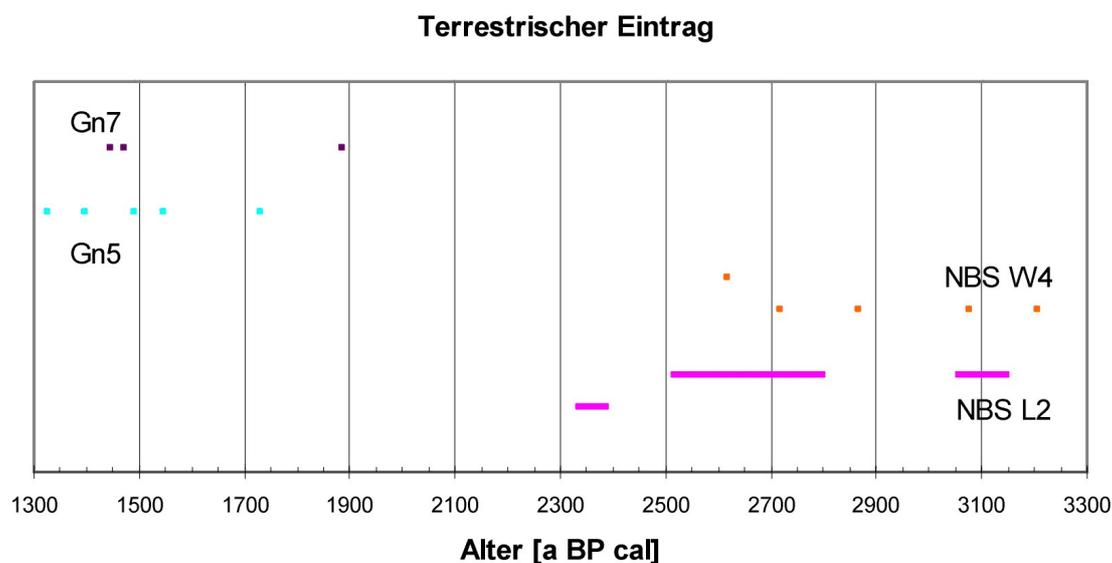


Abbildung 40: Phasen mit terrestrischem Eintrag rekonstruiert anhand der XRD-Analyse. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Proben durchgeführt wurden). Der in Probe 122 erhöhte Quarzgehalt zeigt bereits allochthonen Eintrag an, während sich in der chemischen Analyse Hinweise auf allochthonen Eintrag erst rund 40 Jahre später (7 cm höher) bemerkbar machen (s.a. Abbildungen 19, 27 & 37). Der nur gegenüber den Proben im Liegenden und Hangenden geringfügig höhere Quarzgehalt in Probe 136 (s.a. Abbildung 19) hat keine Entsprechung in der geochemischen Analyse. Entweder ist dieses Signal auf die eine Probe (d.h. auf 1 cm Mächtigkeit) begrenzt und damit geochemisch nicht erfasst oder, was wahrscheinlicher erscheint, der allochthone Eintrag ist nur sehr geringfügig erhöht, sodass sich keine geochemischen Veränderungen zeigen.

Im Folgenden werden die Eintragsphasen in den beiden Kernen miteinander und mit der bekannten Siedlungstätigkeit verglichen (von jung nach alt).

Die in NBS L2 um 2370/2330 BP cal gefundene Phase erhöhten Eintrags (Abbildungen 38 & 40) lässt sich nicht mit einer Besiedlungsphase in Zusammenhang bringen, möglicherweise aber mit dem um 2400 BP cal leicht gesunkenen Wasserspiegel (s.a. Abbildung 41).

Der in der Zeit von 2480-2760 BP cal gefundene allochthone Eintrag in NBS L2 ist in Kern NBS W4 ab 2580 BP cal deutlich. Aufgrund der Probenahme wird die mögliche Fortdauer in NBS W4 nicht erfasst. Die Unterschiede zwischen den Kernen können durch ihre Position erklärt werden: Kern L2 liegt in flacherem Wasser und näher an der Siedlung, reagiert folglich schneller auf menschliche Aktivitäten. Man kann annehmen, dass der Eintrag des allochthonen Materials

zunächst aufgrund anthropogener Tätigkeit erfolgte (Besiedlung 2750-2820 BP cal, GOLLNISCH-MOOS 1999). Dem schließt sich ohne Übergang der Eintrag durch den steigenden Seespiegel an. Der anthropogene Eintrag wird in NBS W4 nur mit einem schwachen Signal erfasst. Deutlich wird bei dieser Betrachtung, dass der Mensch als Verursacher des allochthonen Inputs nicht zwingend notwendig ist.

Die in NBS W4 für die Zeit um 2870 BP cal (Abbildungen 38 & 40) gefundene Eintragsphase kann mit keinem Ereignis direkt korreliert werden. Sie liegt kurz vor oder am Beginn der Siedlungsphase; möglicherweise ist sie durch die Bautätigkeit zu erklären. Unklar bliebe dann der geringe Eintrag in NBS W4 zwischen 2870 und 2720 BP cal während der Besiedlung, der aber nur durch eine röntgenographisch untersuchte Probe repräsentiert wird. Eine passende Erklärung wäre eine ungenaue Datierung, d.h. das für 2870 BP cal erfasste Ereignis wäre eigentlich jünger und würde durch die erste Besiedlung verursacht. Diese wäre in NBS L2 nicht erfasst.

Um 3100 (NBS L2) bzw. 3080 BP cal (NBS W4) tritt wieder eine Phase mit allochthonem Eintrag in beiden Kernen auf (Abbildungen 38 & 40). Diese Position markiert in NBS L2 den aufgearbeiteten oder zersetzten Torf. Hier könnte sich eine beginnende Bodenbildung zeigen. Schwierig ist die Erklärung für die im Hangenden des zersetzten Torfes vorkommende dünne Seekreidelage (s.a. Abbildung 21) ohne allochthonen Eintrag und den allochthonen Input, der nach Ablagerung dieser Schicht einsetzt (2760 BP cal, s.o.). Möglicherweise wird dieser Eintrag durch die zweite Besiedlungsphase (2585-2613 BP cal, GOLLNISCH-MOOS 1999) ausgelöst. Eine Erklärung für den allochthonen Eintrag in Kern NBS W4 sowohl für die Zeit um 3080 BP cal als auch um 3210 BP cal kann nicht gefunden werden. Sowohl Bodenbildung als auch anthropogener Einfluß oder veränderter Seespiegel sind für diese Zeiten und an dieser stratigraphischen Position nicht anzunehmen.

Für den Bodensee-Gnadensee gelten wieder die bezüglich Datierungen und Probandichte bereits gemachten Einschränkungen. Die Überlappung der mit der röntgenographischen sowie der geochemischen Methode rekonstruierten Zeiten gelingt nur teilweise (Abbildungen 38 & 40). Extrapoliert man die Ergebnisse der röntgenographischen Untersuchung in Kern Gn5 auf die jeweilige Schicht (in Kern Gn7 wegen fehlender scharfer Schichtgrenzen nicht möglich), so zeigt sich für Gn5 eine gute Übereinstimmung beider Methoden. Die für die Zeit um 1320 BP cal röntgenographisch erfasste (Abbildung 40) und die für die Zeit um 1600 BP cal chemisch (Abbildung 38) erfassten Phasen allochthonen Eintrags haben wegen unterschiedlicher

Beprobung kein Pendant in der jeweils anderen Methode. Gleiches gilt für die in Gn7 sich nicht entsprechenden Bereiche. Somit unterstützen sich beide Methoden weder, noch widersprechen sie sich.

Es sei darauf hingewiesen, dass die in Gn5 um 1400 cal und in Gn7 um 1460 BP cal beobachteten terrestrischen Einträge in den See ebenso wie die bereits durch den organischen Gehalt nachgewiesene Steigerung der Produktivität des Sees mit der alemannischen Landnahme in Zusammenhang stehen kann. Die Phase um 1600 BP cal könnte spätrömische Verursacher haben. Dies bleibt jedoch spekulativ.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für den Nussbaumer See die anthropogene Beeinflussung des Sediments während der ausgehenden Bronze- und beginnenden Eisenzeit wahrscheinlich ist. Die anthropogene Tätigkeit zeigt sich in Form von erhöhtem terrestrischem Eintrag und Hinweisen auf eine Eutrophierung des Sees. Angemerkt werden muss, dass beide Indikatoren auch während Zeiten ohne nachgewiesene Seeuferbesiedlung auftreten, eine klare Trennung von anthropogenen und natürlichen Ursachen hier nicht gemacht werden kann.

Am Bodensee-Gnadensee finden sich ebenfalls Hinweise auf terrestrischen Eintrag und Eutrophierung des Sees. Aufgrund der Datierungsunschärfe der Kerne kann der Zusammenhang zwischen diesen Indikatoren anthropogener Tätigkeit und spätrömischer Siedlungstätigkeit sowie der alemannischen Landnahme nur postuliert werden. Weitere Aussagen sind nicht möglich. Bei dichterem Beprobung und vor allem besserer Datierung versprechen die in dieser Arbeit untersuchten Sedimente aus dem Gnadensee weitere gute Möglichkeiten zur hochauflösenden Landschaftsrekonstruktion.

3.2 Seespiegelschwankungen

Im Nachfolgenden werden zunächst die Methoden zur Rekonstruktion von Seespiegelschwankungen genannt, anschließend auf spezifische Probleme der hier behandelten Seen eingegangen und schließlich die Ergebnisse und Interpretationen dargelegt und miteinander verknüpft.

3.2.1 Theoretischer Hintergrund

Seespiegelschwankungen können durch Klimaveränderungen (Niederschlag, Temperatur, Saisonalität) und durch Veränderungen des hydrologischen Regimes eines Sees (Blockade/Erosion der Ausflussschwelle, verändertes Retentionsvermögen im Einzugsgebiet) verursacht werden (s.a. AMMANN 1983). VASSILJEV et al. (1998) haben bei einer Modellierung eines Sees mit kleinem Einzugsgebiet (ähnlich dem Nussbaumer See) in Südschweden festgestellt, dass bereits eine geringfügig niedrigere Jahresniederschlagsmenge (bei veränderter Niederschlagsverteilung sowie etwas wärmeren Wintertemperaturen) alle holozänen Seespiegelschwankungen dieses Sees erklären kann.

Wasserspiegelschwankungen können am Wechsel von terrestrischen zu lakustrinen Sedimenten (bzw. umgekehrt) erkannt werden (AMMANN 1983). Beispielsweise belegt in Bohrkern NBS L2 der Wechsel von Torf im Liegenden zu Kalkmudde im Hangenden eine Transgression. Erfasst werden mit dieser Methode absolute Wasserstände im Sinne von Mindesthöhen bzw. -tiefen. Eine weitere Methode zur Rekonstruktion der Seespiegel ist das Erkennen, Dokumentieren und Datieren von ehemaligen Stränden oder Strandwällen (AMMANN 1983). Diese Methode konnte am Bodensee-Untersee in Horn angewandt werden (ELLMINGER in Vorber.). Voraussetzung ist hier das Vorhandensein geeigneter Lokalitäten. Erfasst wird eine Wasserstandsmarke, die einen Hochstand anzeigt.

Ist die Rekonstruktion nicht so direkt möglich, können Seespiegelschwankungen durch Hiaten, die in Kernen aus einem Transekt senkrecht zum Ufer ab einer bestimmten Wassertiefe auftreten, rekonstruiert werden (DIGERFELDT 1986). Diese Hiaten entstehen durch ausbleibende Sedimentation oder durch Erosion bereits abgelagerter Sedimente. Hiaten zeigen meist einen gesunkenen Seespiegel (tiefere Wellenbasis) an (AMMANN 1983, KLEINMANN 1995, hier

auch andere Ursachen für Hiaten, z.B. subaquatische Rutschungen oder außergewöhnliche Sturmereignisse). Ein niedriger Seespiegel muss nicht über den ganzen Zeitraum des Hiatus bestanden haben. Zum Beispiel: Ein Hiatus von 2000 bis 3000 BP cal kann - muss aber nicht - durch einen zwischen 2100 und 2000 BP cal niedrigeren Seespiegel und die dadurch tiefer reichende Erosion entstanden sein. Im Uferbereich kann ein durch fehlende Sedimentation entstandener Hiatus durch Erosion bei einem steigenden Seespiegel vergrößert werden. Die Rekonstruktionsmethode anhand von der Hiaten erfasst relative, nicht absolute Wasserspiegelbewegungen.

Die Seepegelgeschichte kann auch mit der von MAGNY (1992 a, b) beschriebenen Analyse der Kalkkonkretionen rekonstruiert werden. Voraussetzung für diese Methode ist das Vorhandensein von kalkkonkretionsbildenden Wasserpflanzen und einem geringen Anteil organischer Substanz im Sediment. Dies ist in der vorliegenden Arbeit für den Kern NBS L2 im untersuchten Zeitbereich durchgehend gegeben. Mit der Seepegelrekonstruktion durch Kalkkonkretionen werden relative Wasserspiegelbewegungen erfasst.

Für eine optimale Rekonstruktion des Seespiegels sollten mehrere Transekte und mehrere Methoden benutzt werden (DIGERFELDT 1986, 1998).

Die Rekonstruktion von Seespiegeln wird durch große Flächen eines Sees (hier der Bodensee) und durch jährliche Wasserspiegelschwankungen, die sich mit den säkularen überlagern, erschwert (vergl. DIGERFELDT 1986).

Am Nussbaumer See schwankt der Wasserspiegel im Jahr um 0,8 m (SCHNEGG 1995), am Bodensee beträgt der Jahresgang im Durchschnitt 1,6 m (HANDBUCH HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990, vergl. Kapitel 1.2.3). Während 0,8 m, d.h. 0,4 m Schwankung um den Mittelwasserstand am Nussbaumer See die Unterscheidung von säkularen Wasserspiegelschwankungen wenig erschwert (es wird dabei von säkularen Wasserstandsänderungen $> 0,4$ m ausgegangen), ist für den Bodensee zunächst die Frage, wie ein höherer Wasserstand definiert werden kann.

Die Möglichkeiten der Wasserstandsänderungen an einem See, der wie der Bodensee durch den Alpenrhein auf die Jahresniederschlagsmenge und -verteilung (Schneesmelze!) einer größeren Region reagiert, sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

	Sommerhochwasser	Winterniedrigwasser	resultierender Mittelwasserstand
(1)	höher	höher	höher
(2)	höher	gleichbleibend	höher
(4)	niedriger	niedriger	niedriger
(5)	niedriger	gleichbleibend	niedriger
(7)	höher	niedriger	wenig geändert
(8)	niedriger	höher	wenig geändert

Tabelle 12: Theoretisch mögliche Veränderungen der Sommer- und Winterwasserstände eines Sees und die daraus resultierenden Mittelwasserstände

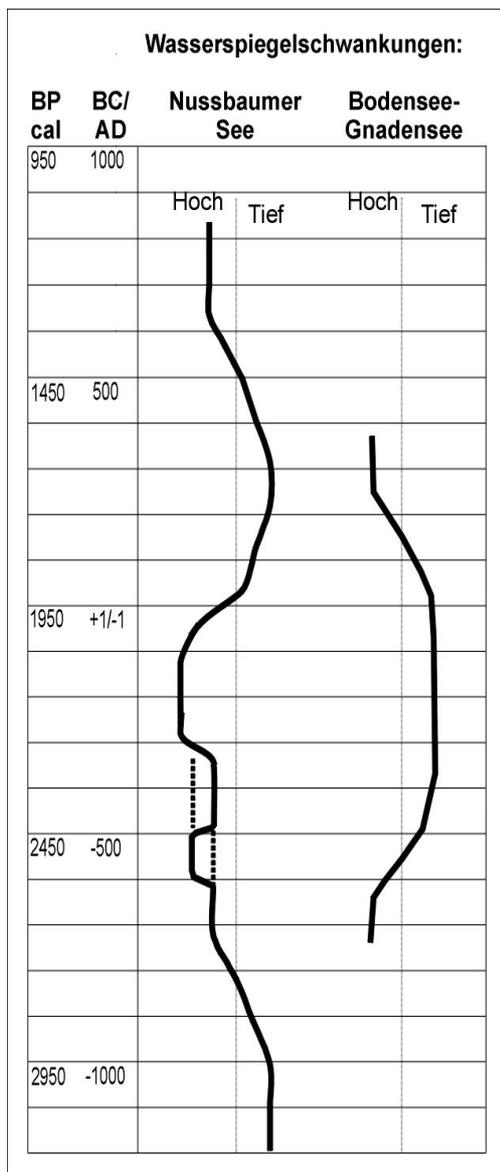
Man sieht aus Tabelle 12, dass der Mittelwasserstand für viele landschaftsgeschichtliche Fragestellungen nicht relevant ist.

Für Seeufersiedlungen dürften vor allem gestiegene Sommerhochwasserstände (Tabelle 12: (1), (2) & (7)) wichtig sein, da diese sich durch alljährlich wiederkehrende Überflutungen des Siedlungsareals bemerkbar machen würden. Dies würde wahrscheinlich zu einer Verlagerung der Siedlung oder zu einer Erhöhung der Hausböden führen.

Bei der Betrachtung von Strandwällen ist ein höheres Mittelwasser, vor allem aber ein höheres Sommerhochwasser relevant. Dies gründet sich auf die Beobachtung, dass bei Wasserhöchstständen die bei niedrigeren Wasserständen aufgeschüttete Sedimente wieder erodiert werden. Widersprüchlich hierzu erscheint die Beobachtung, dass bei dem außergewöhnlichen Hochwasser des Bodensees 1999 nur lokal und wenig Sediment (cm-Bereich) auf dem hohen Niveau abgelagert wurde. Zur Ablagerung von Strandwällen an Binnenseen wären weitere Untersuchungen wünschenswert.

3.2.2 Interpretation

Fassen wir die in den vorhergehenden Kapiteln bezüglich Wasserspiegelbewegungen vorhandenen Ergebnisse zusammen (sofern nicht anders beschrieben, dient der heutige Seepiegel als Vergleich):



als Vergleich):

Am Nussbaumer See ist durch die Torfschicht in L2 (und an weiteren Lokalitäten, GOLLNISCH-MOOS mündl. Mitteilung) zunächst ein niedriger Seepiegel für die Zeit bis 3100 BP cal belegt (Beginn dieser Phase hier nicht erfasst). Spätestens ab 2750 BP cal (Datierung durch archäologische Befunde) ist ein höherer Wasserspiegel durch die Kalkmuddeschicht in Bohrkern NBS L2 und NBS L10 angezeigt (Abbildung 41). In dieser Kalkmudde-/Seekreideschicht in Bohrkern NBS L2 kann anhand der Partikelanalyse zunächst der Anstieg des Wassers belegt werden. Dieser im Vergleich zum folgenden relativ niedrige Seespiegel (immer noch höher als heute) steigt um 2500 BP cal für möglicherweise 100 Jahre an (evtl. länger) und sinkt dann, wahrscheinlich auf ein ähnliches Niveau wie vor diesem Anstieg, ab. Ein weiterer Maximalstand ist für die Zeit um 2200 BP cal durch die Konkretionen belegt. Anschließend sinkt der Seespiegel rasch ab. Dieser tiefe Stand wird auch durch ein stark organisches Sediment (Uferbereich) in NBS L10 belegt. Im selben Kern zeigt eine Kalkmudde-schicht über besagtem organischen Sediment einen hohen Wasserspiegel für die Zeit um 1200 BP cal an.

Abbildung 41 : Modell der relativen Wasserspiegelschwankungen des Nussbaumer Sees und des Bodensees anhand stratigraphischer und sedimentologischer Indizien.

Die eben beschriebenen Schwankungen ergänzen die von RÖSCH (1985, 1995) erstellte Wasserspiegelkurve. RÖSCH (1995) geht von einem kontinuierlichen Anstieg des Wasserspiegels seit etwa 4000 BP cal aus, wobei das zugehörige Pollendiagramm für die Zeit um 2750 BP cal nur eine geringe Auflösung besitzt.

Für den Bodensee-Untersee kann für den Zeitraum 1800-2500 BP cal anhand des pollenanalytisch erfassten Hiatus in Bohrkern Gn5 (s. Kap. 2.2.2.2), der im tiefergelegenen Gn6 nicht auftritt, ein niedrigerer Seepiegel als heute postuliert werden (Abbildung 41). Als relevanter Seepiegel ist hier das (Winter-) Niedrigwasser anzunehmen, da der niedrigste Wasserstand im Jahreslauf die tiefste Erosion verursacht. Zum Mittelwasserstand während des o.g. Zeitraums kann keine Aussage gemacht werden.

Weitergehende Aussagen zu Seespiegelveränderungen am Bodensee-Untersee können mit Hilfe der Bohrkernkerne aus dem Gnadensee nicht gemacht werden. Ergänzend seien hier noch Ergebnisse im Rahmen des selben Projekts von der Untersuchung einer ehemaligen Strandsituation in Horn/Bodensee-Untersee genannt: Ein höherer Seespiegel ist für die Zeit um 7000 BP cal und für den Zeitraum 4600-4200 BP cal (ELLMINGER in Vorber.) anzunehmen. In der Folgezeit stagniert oder oszilliert der Wasserspiegel leicht, daran schließt sich ein weiterer Anstieg, der um 3700 BP cal endet, an (ELLMINGER in Vorber.).

Im Folgenden werden die Seespiegelbewegungen im Zeitraum 1200-4600 BP cal mit weiteren Untersuchungen verglichen.

RÖSCH (1997) findet hohe Seespiegel des Bodensees für die Zeiträume 1200-2000 BP cal sowie 3500-4600 BP cal; Hinweise auf einen Tiefstand hat er für den Zeitraum 2500-3500 BP cal zwischen den vorgenannten Hochständen beschrieben. Weitere Beweise eines hohen Seespiegels während der römischen Besiedlung der Bodenseeufer bieten dendrochronologisch datierte Konstruktionshölzer des römischen Hafens in Bregenz (BILLAMBOZ & TEGEL 1995). Sie weisen auf eine Bauzeit um 1580 BP cal hin und waren mindestens einen Meter über der heutigen Mittelwasserlinie verbaut (BILLAMBOZ & TEGEL 1995). Diese zwei Nachweise eines hohen Seepiegels während der Römerzeit scheinen dem in der vorliegenden Arbeit postulierten tiefen Wasserstand zu widersprechen. Der durch die Datierungen suggerierte

Widerspruch könnte durch den Fehler der Datierung ausgeräumt werden: Durch diese Datierungsungenauigkeit könnte eine zeitliche Differenz zwischen Tief- und Hochstand bestehen. Unter dieser Voraussetzung würde auf den Tiefstand rasch der Hochstand folgen. Zwei weitere Erklärungen wären ebenfalls möglich: Der Hiatus in Gn5 ist eine lokale Erscheinung und nicht auf einen tieferen Wasserstand zurückzuführen. Möglicherweise ist aber auch der hier postulierte Hiatus zeitlich älter. Damit wäre er identisch mit dem von RÖSCH (1997) für den Zeitraum 2500-3500 BP cal angenommenen Tiefstand. Um eine der Erklärungen zu verifizieren ist eine genauere Datierung mit engeren Probenabstände der hier bearbeiteten Bohrkerne notwendig.

3.3 Vergleich der Sedimentationsgeschichte

Die Sedimente der Kerne und Seen wurden bereits Kapitel 2.1, die zugehörigen Analysen in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Ein direkter Vergleich zeitgleich abgelagerter Sedimente ist wegen der unterschiedlichen Alterseinstufung in beiden Seen nicht möglich.

Ein solcher Vergleich wäre nur von begrenztem Nutzen, denn die untersuchten Sedimente zeigen, dass der Sedimenttyp nicht von der Größe des Sees oder der Bildungszeit, sondern von der Fazies abhängig ist. Beispielsweise wurden im Holozän je nach Seestand in beiden Seen mehrfach Seekreiden gebildet (vergl. Kap. 2.1).

Dennoch lassen sich allgemeine Unterschiede feststellen. Im tieferen Wasser des Nussbaumer Sees (NBS W3, W4) kam es nie zur Anlagerung von Seekreiden. Hier wurden immer Kalkmudden sedimentiert. Am Bodensee ist dies nicht so bzw. nicht für die hier genommenen Kerne, die aus einer ähnlichen Wassertiefe stammen wie die aus dem Nussbaumer See (maximal 5,25 m). Dieses unterschiedliche Sedimentationsverhalten könnte auf den Nährstoffgehalt beider Seen zurückzuführen sein.

Der Nussbaumer See ist heute nährstoffreicher als der Bodensee-Gnadensee. Die Sichttiefe ist im Nussbaumer See entsprechend geringer. Überträgt man diesen Ist-Zustand auf die untersuchten Zeiträume, dann ist die in `W"-Kernen des Nussbaumer Sees vorgefundene Kalkmudde auf die Ablagerung von organischer Substanz durch Algen (sichtbar heute als Wassertrübe; im Kern z.T. seifiges Material) und durch die autochthone Kalkbildung und/oder Verlagerung der im flacheren Wasser zeitgleich gebildeten Seekreide zu erklären. D.h. hier überlagern sich drei unterschiedliche Sedimentationsvorgänge.

Im Gnadensee ist das Wasser weniger nährstoffreich, die Produktivität und damit die Sedimentation organischen Materials geringer. Die Sedimente des Kern Gn7 ähneln den Kalkmudden von NBS W3 und W4 am meisten, der gesamte Kern besitzt jedoch einen höheren durchschnittlichen Kalkgehalt.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Kernen aus dem Nussbaumer See und den Kernen Gn3-Gn6 sind die häufigeren und meist diskordanten Sedimentwechsel in Letzteren. Am deutlichsten ist dies in Gn5 ausgeprägt. Dieser Kern weist die höchste Standardabweichung der CaCO_3 -Gehalte, die auf Hiaten und den diskordanten Sedimentabfolge zurückgeführt wird.

Gn3-Gn6 wären am ehesten mit NBS W1 zu vergleichen, der jedoch eine wesentlich lückenhaftere Sedimentation als die genannten Kerne aus dem Gnadensee aufweist. Im Gnadensee scheinen sich die Sedimentationsprozesse rascher (eher scharfe Schichtgrenzen) zu verändern als am Nussbaumer See (häufig fließende Schichtgrenzen abgesehen von den Wechseln von Torf zu Kalkmudde). Diese differierenden Ablagerungsprozesse in beiden Seen können auf deren Größe zurückgeführt werden (im Gegensatz zu den Sedimenttypen): Die Dynamik der Sedimentation und Erosion im Gnadensee ist durch dessen Größe stärker als im Nussbaumer See. Die Dynamik im Gnadensee wird einerseits durch die größere Windexposition, andererseits durch die größeren jährlichen Wasserspiegelschwankungen und deren Variation verursacht. Des Weiteren spielen auch die höheren Sedimentationsraten im Gnadensee eine Rolle. Diese Sedimentationsraten sind Ausdruck der breiten Flachwasserzone als Siedlungsfläche für die kalkabscheidenden Makrophyten.

3.4 Vergleich mit anderen Seen

Hier sollen die aus den Daten dieser Arbeit gezogenen umweltrelevanten Schlüsse mit denen anderer Seen verglichen werden.

Eintrag von allochthonem, d.h. terrestrischem Material infolge anthropogener Aktivität (Rodung) in prähistorischer Zeit konnte beispielsweise in folgenden Seen festgestellt werden: Steißlinger See (EUSTERHUES 2000), Ammersee (Maximum in der Römerzeit, KLEINMANN 1995), Schalkenmehrener Maar (REIN & NEGENDANK 1993), Luganer See (Maximum 2750-2050 BP cal, NIESSEN et al. 1992). Eine direkte Korrelation der einzelnen Eintragsphasen der verschiedenen Seen miteinander und mit den hier untersuchten Seen ist nicht sinnvoll, da die Eingriffe des Menschen in prähistorischer Zeit lokal waren. Somit ist der Eintrag terrestrischen Materials infolge anthropogener Tätigkeit direkt an eine nahe dem See oder am See gelegen Siedlung geknüpft.

Da der Allochthoneintrag in einen See nicht zwangsweise anthropogen ist (vgl. z.B. REIN & NEGENDANK 1993), kann allochthones Sedimentmaterial nicht als eindeutiges Indiz für Siedlungstätigkeit genutzt werden. Siedlungsaktivitäten und allochthoner Input in einen See müssen immer zunächst getrennt betrachtet und anschließend miteinander korreliert werden.

Eindeutig durch anthropogenen Einfluß erhöhte Schwermetallgehalte (ausgenommen neuzeitliche) konnten auch im Steißlinger See, also in direkter Nähe zum Gnadensee, nicht nachgewiesen werden (EUSTERHUES 2000). LEHMANN & MICHLER (1985) fanden in den Sedimenten des Wörthsees (zwischen Ammersee und Starnberger See) erhöhte Bleigehalte ab etwa 6000 BP cal. Diese brachten sie nur allgemein, nicht aber für bestimmte Zeiten mit anthropogener Tätigkeit in Zusammenhang. Möglicherweise zeigt sich in diesen Daten wieder ein Eintrag von terrestrischem Material in den Wörthsee.

Da keine eindeutigen Nachweise von anthropogen erhöhten Schwermetallgehalten in Seen für prähistorische Zeiten bekannt sind, muss momentan davon ausgegangen werden, dass der Eintrag zu jener Zeit zu gering war, um sich von natürlichen Schwankungen zu unterscheiden.

Über eine bestimmte Region synchrone Seespiegelbewegungen können mit klimatischen Veränderungen begründet werden (YU 1996). Deshalb waren Seespiegelbewegungen häufig ein

Teil der palaeolimnologischen Untersuchungen von Seen weltweit. Eine Datenbank von Seespiegelbewegungen in Europa erstellten YU & HARRISON (1995). Neuere Zusammenfassungen sind bei DIGERFELDT 1998 (Schweden), HAAS et al. 1998 (Schweizer Mittelland und Alpen), MAGNY & RICHOZ 1998 (vor allem Jura und französische Voralpen) und RÖSCH 1997 (Voralpengebiet, auch Jura) zu finden.

Am interessantesten für den Vergleich mit dem Nussbaumer See und dem Bodensee-Gnadensee sind aufgrund ihrer geographischen Lage und ähnlichem Klima die Seen des Jura, des Schweizer Mittellandes und des Voralpengebietes. Bei den Juraseen sind höhere Wasserstände für den Zeitraum 2750-2150 BP cal (Bourget-Transgression mit einer Unterbrechung von ca. 2550-2450 BP cal) und dann wieder für die Zeit 1800-1650 BP cal gefunden worden (MAGNY & RICHOZ 1998, MAGNY & RUFFALDI 1995). Für den Ammersee fand KLEINMANN (1995) relativ hohe Wasserstände für die Zeiträume 2500-1900 BP cal und dann wieder von 1600-300 BP cal. LIESE-KLEIBER (1988) ermittelte für den Federsee (Oberschwaben) eine Phase mit hohem Wasserstand für den Zeitraum 2300-2450 BP cal.

Die Bourget-Transgression (2750-2150 BP cal) mit ihrer Zweiteilung und die quasi zeitgleichen Hochstände an Ammer- und Federsee sind in der Seespiegelkurve des Nussbaumer Sees wiederzufinden (Abbildung 41). Die genaue Eingrenzung der Unterbrechung des Bourget-Hochstandes ist nicht identisch mit der für den Nussbaumer See gefundenen. Dies kann auf Datierungsungenauigkeiten und/oder auf die unterschiedliche Reaktionszeiten der Seen auf die veränderten Umweltbedingungen zurückgeführt werden. Der im Jura hohe Wasserspiegel (schwächer ausgeprägt als die Bourget-Transgression) zwischen 1800 und 1650 BP cal ist im Nussbaumer See nicht vorhanden. Hingegen findet sich der im Ammersee um 1600 BP cal belegte Wasserspiegelanstieg auch im Nussbaumer See. Geographisch betrachtet liegt der Nussbaumer See etwa in der Mitte zwischen den Juraseen und dem Ammersee. Die Niederschlagsmenge und -verteilung wird sowohl am Ammersee als auch am Nussbaumer See stark durch den "Nordstau" der Alpen beeinflusst; dies ist bei den Juraseen nicht der Fall. Eine Veränderung dieser Niederschläge könnte somit das unterschiedliche Verhalten von Nussbaumer See und Ammersee einerseits und den Juraseen andererseits erklären. Die klimatisch "ungünstigen" Phasen Göschenen 1 und Göschenen 2, die auf der nördlichen Halbkugel häufig nachgewiesen wurden (HAAS et al. 1998) sind zeitgleich mit den Seespiegelbewegungen und könnten deren Ursache sein.

Der in dieser Arbeit für den Bodensee gefundene Tiefstand im Zeitraum 2500-1800 BP cal könnte dem niedrigen Wasserstand der Juraseen zwischen 2150 und 1800 BP cal (MAGNY & RUFFALDI 1995) entsprechen. Wegen der Datierungsunschärfe wird der Tiefstand des Bodensees nicht weiter diskutiert.

Erwähnenswert sind die von EUSTERHUES (2000) in den Sedimenten des Steißlinger Sees gefunden kurzfristigeren (20-300 Jahre) Sedimentationswechsel zwischen ca. 6300 und 1500 BP cal. Die Autorin führt diese Wechsel auf sich ändernde Redoxbedingungen an der Sedimentoberfläche durch Schwankungen der Chemokline des Sees zurück. Zumindest für einen Teil der Wechsel werden klimatische Ursachen angenommen (Eusterhues 2000). Ähnliche Wechsel beobachtete MERKT & MÜLLER (1995) im Degersee und Schleinsee (östlich des Bodensee-Obersees). Hier wechseln laminierte, karbonatreiche Abschnitte mit bioturbat gestörten, karbonatarmen und diatomeenreichen Einheiten. Diese in den vorgenannten Arbeiten erwähnten kurzfristigen Sedimentationswechsel sind auch in den Kernen aus dem Markelfinger Winkel zu sehen. Hier wechseln dunkle, karbonatarme Straten mit hohem Gehalt an organischer Substanz mit hellen Abschnitten, die einen hohen Karbonatgehalt und wenig organische Substanz aufweisen. Dabei sind im Gegensatz zu MERKT & MÜLLER (1995) die karbonatarmen, an organischer Substanz reicheren Abschnitte z.T. grob laminiert. Sowohl die genannten geochemischen Parameter als auch die Ausbildung der Schichtung sind mit einer zeitweiligen Sauerstoffarmut (und damit ebenfalls geänderten Redoxbedingungen) an der Sedimentoberfläche des Gnadensees zu erklären.

4 **Ausblick**

Die Grenzen zur Korrelation der Ergebnisse mit bekannten anthropogenen und klimatischen Einflüssen werden durch die Datierungen gesetzt. Nur durch die Untersuchung jahreszeitlich geschichteter Sedimente ist die notwendige zeitliche Auflösung für genaue Korrelationen gegeben.

Weitere Untersuchungen wären vor allem an den Kernen aus dem Gnadensee wünschenswert. Hier könnte eine bessere Datierung mit höher auflösenden Pollendiagrammen erreicht werden. Möglicherweise finden sich im Kern Gn7 bzw. in weiteren Kernen dieser Lokalität gewarvte Sequenzen, die eine noch genauere zeitliche Auflösung bieten könnten. Dann verspricht zum einen eine noch höher auflösende mineralogisch-geochemische Untersuchung Erfolg, zum anderen könnten weitere Hinweise zu Seespiegelveränderungen gesammelt werden.

Die Eutrophierungsgeschichte der Seen sollte durch die Untersuchung von Pigmenten und/oder durch eine Diatomeenanalyse verbessert werden.

Eine in der Arbeit immer wiederkehrende Frage, für die es bisher keine zufriedenstellende Antwort gibt, war die nach der in situ Bildung homogener (d.h. hier ohne Lamination) Seekreide- oder Kalkmuddeschichten. Sind diese tatsächlich durch Bioturbation eigentlich laminiertes Sedimente zu erklären (und damit ein Hinweis auf Sauerstoff im bodennahen Wasser) oder entstanden sie durch Erosion und anschließende (möglicherweise rasche) Resedimentation? Zu Klärung dieser Frage sind gezielte Untersuchungen wünschenswert, da dadurch die landschaftsgeschichtliche Relevanz eines häufig auftretenden Sedimenttyps geklärt würde.

5 Literaturverzeichnis

AABY, Bent 1986: Palaeoecological studies of mires. In: BERGLUND, Björn E. 1986: Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Chichester (Wiley & Sons): 145-164.

AMMANN, Brigitta 1983: Säkulare Seespiegelschwankungen: wo, wie, wann, warum? Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern N. F. 39, Band 1982: 97-106.

BECKER, Bernd 1982: Dendrochronologie und Paläoökologie subfossiler Baumstämme aus Flussablagerungen. Ein Beitrag zur nacheiszeitlichen Auenentwicklung im südlichen Mitteleuropa. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften Bd. 5. Wien (Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften).

BEHBEHANI, Ahmad-Reza 1987: Sedimentations- und Klimageschichte des Spät- und Postglazials im Bereich der Nördlichen Kalkalpen (Salzkammergutseen, Österreich). Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie 34. Göttingen (Selbstverlag der Geologischen Institute der Georg-August-Universität Göttingen).

BEHBEHANI, Ahmad-Reza, MÜLLER, J., SCHMIDT, R., SCHNEIDER, J., SCHRÖDER, H.-G., STRACKENBROCK, I. & STURM, M. 1986: Sediments and sedimentary history of Lake Attersee (Salzkammergut, Austria). Hydrobiologia 143: 233-246.

BILLAMBOZ, André & TEGEL, Wilhelm 1995: Die dendrochronologische Datierung des spätrömischen Kriegshafens von Bregenz. Jahrbuch des Vorarlberger Landesmuseumsvereins - Freunde des Landeskunde 1995. Bregenz: 23-30.

Billamboz, André, Dieckmann, B., Ellminger, F., Gollnisch-Moos, Haas, J.N., H., Hasenfrazz, A., Schlichtherle H., Vogt, R., Wehrli, M. (in Vorber.): Changes of landscape and settlement patterns in the western Lake of Constance area. - In: Archaeometry.

BLUM, Hubert, MÜLLER, H. E., OSTENDORP, W.: Entwicklungsgeschichte des Radolfzeller Aach-Deltas im Verlandungsgebiet des westlichen Bodensee-Untersees. DFG-Abschlußbericht, unveröffentlicht

BRAUN, Eberhard & SCHÄRPF, Klaus 1994: Internationale Bodenseetiefenvermessung 1990. Stuttgart (Landesvermessungsamt Baden-Württemberg).

BREM, Hansjörg 1997: Leben mit der Grenze: die römische Zeit im Thurgau. Archäologie der Schweiz 20/2: 80-83.

BROCHIER, Jaques-Leopold & JOOS, Marcel 1982: Un élément important du cadre de vie des Néolithiques d'Auvernier-Port: le lac Approche sédimentologique. La Station littorale d'Auvernier-Port: Cadres et évaluation. Cahiers d'Archéologie Romande 25 Auvernier 5

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE UND GEOLOGISCHE LANDESÄMTER IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (Hg.) 1996: AG Bodenkunde, Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart (Schweizerbart).

DE WALL, Helga 1998: Magnetische Suszeptibilität. In: SCHREINER, Matthias & KREYSING, Klaus 1998: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten Bd. 4: Geotechnik Hydrogeologie (Hg.: BGR, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Berlin [u.a.] (Springer): 233-238.

DIECKMANN, Bodo 1986: Die neolithischen Ufersiedlungen von Hornstad-Hörnle am Bodensee, Kreis Konstanz, die Grabungskampagne 1984/85. Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 1985: 59-66.

DIECKMANN, Bodo 1987: Ein mittelpaläolithischer Fundplatz bei Mühlhausen im Hegau - Stratifizierte Funde der Hinkelsteingruppe, der Stichbandkeramik und der Großgartacher Gruppe. In: Siedlungsarchäologische Untersuchungen im Bodenseeraum, Nachdruck der Archäologischen Nachrichten aus Baden Hefte 38/39. Freiburg i. Brsg.: 20-28.

DIECKMANN, Bodo 1991: Zum Stand der archäologischen Untersuchungen in Hornstaad. In: Siedlungsarchäologische Untersuchungen im Alpenvorland. Sonderdruck aus Bericht der Römisch Germanischen Kommission 71. Mainz (Philipp von Zabern): 84-109.

DIGERFELDT, Gunnar 1986: Studies on past lake-level fluctuations. In: BERGLUND, Björn E. (Hg.) 1986: Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Chichester (Wiley & Sons): 127-143.

DIGERFELDT, Gunnar 1998: Reconstruction of Holocene lake-level changes in southern Sweden: technique and results. Paläoklimaforschung/Palaeoclimate Research 25: 87-98.

ELLMINGER, Frank (in Vorber.): Beitrag zur Sedimentations- und Ufergeschichte des Bodensee-Untersees.

EUSTERHUES, Karin 2000: Die Sedimente des Steißlinger Sees (Hegau, Süddeutschland), - Ein Archiv für zeitlich hoch aufgelöste geochemische Untersuchungen zu Umweltveränderungen im Holozän. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen.
<http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2000/eusterhues/index.htm>

FAEGRI, Knut & IVERSEN, Johs. 1989: Textbook of Pollen Analysis. IV. Faegri, K., Kaland, P.E. & Krzywinski, K. John (Ed.). Chichester [u.a.] (Wiley&Sons).

FÜCHTBAUER, H. 1977: Karbonatgesteine. In: FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. 1977: Sedimente und Sedimentgesteine. Sediment-Petrologie Teil II. 3. Auflage: 275-417. Stuttgart (Schweitzerbart).

FURGER, Alex R. 1980: Sedimentologie. In: FURGER, Alex R. 1980: Die Siedlungsreste der Horgener Kultur - Text -. Die neolithischen Ufersiedlungen von Twann Bd. 7. Bern (Staatlicher Lehrmittelverlag): 178-191.

GOLLNISCH-MOOS, Hartmut 1999: Ürschhausen-Horn Haus und Siedlungsstrukturen der spätestbronzezeitlichen Siedlung. Archäologie im Thurgau 7, Forschungen im Seebachtal 3. Frauenfeld (Amt für Archäologie).

HAAS, Jean Nicolas & HADORN, Philippe 1998: Die Vegetations- und Kulturlandschaftsgeschichte des Seebachtals von der Mittelsteintzeit bis zum Frühmittelalter anhand von Pollenanalysen. In: HASENFRATZ, Albin & SCHNYDER, Matthias 1998: Das Seebachtal - Eine archäologische und paläoökologische Bestandsaufnahme. Archäologie im Thurgau 4, Forschungen im Seebachtal 1: 221-255. Frauenfeld.

HAAS, Jean N., RICHOZ, I., TINNER, W., WICK, L. 1998: Synchronous Holocene climatic oscillations recorded on the Swiss Plateau and at timberline in the Alps. - *The Holocene*, 8, 3: 301-309.

HANDBUCH HYDROLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG 1990: Teil 6, 6,2 Berichte. Veränderungen der Bodensee-Wasserstände von 1887 bis 1987. Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg: Karlsruhe.

HANTKE, René 1980: Die jüngste Erdgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete. Eiszeitalter. Band 2. Thun (Ott).

HASENFRATZ, Albin 1995: Die frühen Jäger und Siedler im Seebachtal. In: SCHLÄFLI, August (Hg.) 1995: Die Nussbaumer Seen. Eine Naturmonographie. Ittinger Schriftenreihe Band 5. Frauenfeld: 61-76.

HASENFRATZ, Albin & SCHNYDER, Matthias 1998: Das Seebachtal - Eine archäologische und paläoökologische Bestandsaufnahme. Archäologie im Thurgau 4, Forschungen im Seebachtal 1. Frauenfeld (Amt für Archäologie).

HENNIG, W. 1972: Wirbellose I. Taschenbuch der speziellen Zoologie Teil 1. Frankfurt/Main & Zürich (Harri Deutsch).

HOFMANN, Franz 1967: Erläuterungen zum Blatt 1052 Andelfingen. Geologischer Atlas der Schweiz 1:25.000 (Atlasblatt 52). Bern (Kümmerly & Frey).

JUNG, Georg 1994: Seengeschichte: Entstehung, Geologie, Geomorphologie, Altersfrage, Limnologie, Ökologie. Landsberg am Lech (Ecomed).

KELLER, Oskar 1994: Entstehung und Entwicklung des Bodensees - Ein geologischer Lebenslauf. In: MAURER, Hans (Hg.) 1994: Umweltwandel am Bodensee. St. Gallen (UVK): 33-92.

KELLER-TARNUZZER, Karl & REINERTH, Hans 1925: Urgeschichte des Thurgaus. Frauenfeld (Huber).

KELTS, K. & HSÜ, K. J. 1978: Freshwater Carbonate Sedimentation. In: LERMAN, Abraham (Hg.) 1978: Lakes. Chemistry Geology Physics.: 295-323. New York [u.a.] (Springer).

KIEFER, F. 1968: Der Bodensee. In: Staatliche Archivverwaltung Baden-Württemberg in Verbindung mit dem Landkreis Konstanz (Hg.) 1968: Der Landkreis Konstanz, Amtliche Kreisbeschreibung, Bd. 1, Sigmaringen (Thorbecke): 55-104.

KIMMIG, Wolfgang 1959: Vor- und Frühgeschichte des Bodenseeraumes. Jahrbuch des Vorarlberger Landesmuseumsvereins 1958/59: 185-206.

KLEINER, Joachim 1991: Untersuchungen zur Calcitausfällung im Bodensee. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades des Doktors der Naturwissenschaften an der Universität Konstanz. Konstanz (Hartung-Gorre).

KLEINMANN, Angelika 1995: Seespiegelschwankungen am Ammersee. Ein Beitrag zur spät- und postglazialen Klimageschichte Bayerns. *Geologica Bavarica* 99: 253-367.

LANG, Gerhard 1990: Die Vegetation des westlichen Bodenseegebietes. 2. Aufl. Stuttgart [u.a.] (Fischer).

LEHMANN, Reinhold & MICHLER, Günther 1985: Palökologische Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Wörthsee mit besonderer Berücksichtigung der Schwermetallgehalte. *Ber. ANL* 9: 99-122.

LEUZINGER, Urs 1998: Die mesolithischen Stationen im Seebachtal. In: HASENFRATZ, Albin & SCHNYDER, Matthias 1998: Das Seebachtal - Eine archäologische und paläoökologische Bestandsaufnahme. *Archäologie im Thurgau* 4, *Forschungen im Seebachtal* 1. Frauenfeld: 28-52.

LIESE-KLEIBER, Helga 1988: Zur zeitlichen Verknüpfung von Verlandungsverlauf und Siedlungsgeschichte des Federsees. *Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 31: 163-176.

LOIZEAU, Jean-Luc, DOMINIK, J., LUZZI, T. & VERNET, J.-P. 1997: Sediment Core Correlation and Mapping of Sediment Accumulation Rates in Lake Geneva (Switzerland, France) Using Volume Magnetic Susceptibility. *Journal of Great Lakes Research* 23(4): 391-402.

- LUDWIG, Axel 2001: Das Nährstoffelement Phosphor in Limnischen Sedimenten verschiedener Herkunft: Konzentration und Bindungsformen. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- MAGNY, Michel 1992 a: Sédimentation et dynamique de comblement dans les Lacs du Jura au cours des 15 derniers millénaires. *Revue d'Archéométrie* 16: 27-49.
- MAGNY, Michel 1992 b: Holocene lake-level fluctuations in Jura and the northern subalpine ranges, France: regional pattern and climatic implications. *Boreas* 21: 319-334.
- MAGNY, Michel, MOUTHON, J. & RUFFALDI, P. 1995: Late holocene level fluctuations of the lake Ilay in Jura, France: sediment and mollusc evidence and climatic implications. *Journal of Paleolimnology* 13: 219-229.
- MAGNY, Michel & RUFFALDI, Pascale 1995: Younger Dryas and early Holocene lake-level fluctuations in the Jura mountains, France. *Boreas* 24: 155-172.
- MAGNY, Michel & RICHOZ, Isabelle 1998: Holocene lake-level fluctuations in Lake Seedorf, southern Swiss Plateau. *Eclogae geologicae Helvetiae* 91: 345-357.
- MANN, Ulrich 1979: Mineralogisch-Sedimentologische Untersuchungen von Tiefseeablagerungen am ostasiatischen Kontinentalrand unter besonderer Berücksichtigung frühdiagenetischer Veränderungen an biogenem Opal. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Naturwissenschaftlichen Gesamtfakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Heidelberg.
- MASON, Brian & MOORE, Carleton B. 1985: Grundzüge der Geochemie. Stuttgart (Enke).
- MATSCHULLAT, Jörg, ELLMINGER, F., AGDEMIR, N., CRAMER, S., LIEßMANN, W., NIEHOFF, N. 1997: Overbank sediment profiles - evidence of early mining and smelting activities in the Harz mountains, Germany. *Applied Geochemistry* Vol. 12: 105-114.
- MATTER, A. & STURM, M. 1982: Sedimentologische Untersuchungen in den grossen Berner Seen: Brienzer-, Thuner- und Bielersee. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern* N. F. Band 39: 59-73.
- MENKE, Burchard 1989: Seeablagerungen. In: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter in der Bundesrepublik Deutschland (Hg.): Geogenetische Definitionen quartärer Lockergesteine für die Geologische Karte 1:25 000 (GK 25). *Geologische Jahrbuch Reihe A Heft 112*: 178-179. Hannover, in Kommission: Stuttgart (Schweizerbart).
- MERKT, Josef & STREIF, Hansjörg 1970: Stechrohr-Bohrgeräte für limnische und marine Lockersedimente. *Geologisches Jahrbuch* 88: 137-148.

MERKT, Josef, LÜTTIG, G. & SCHNEEKLOTH, H. 1971: Vorschlag zur Gliederung und Definition der limnischen Sedimente. *Geologisches Jahrbuch* 89: 607-623.

MERKT, Josef & MÜLLER, Helmut 1995: Laminated sediments from Neolithic to the Hallstatt period in South Germany. - *PACT*, II.1: 101-116. Zitiert in: EUSTERHUES, Karin 2000: Die Sedimente des Steißlinger Sees (Hegau, Süddeutschland), - Ein Archiv für zeitlich hoch aufgelöste geochemische Untersuchungen zu Umweltveränderungen im Holozän. Dissertation Göttingen. <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2000/eusterhues/index.htm>

MEYERS, P. A. & ISHIWATARI, R. 1995: Organic Matter Accumulation Records in Lake Sediments. In: LERMAN, Abraham, IMBODEN, D. M. & GAT, J. R. (Hg.) 1995: *Physics and Chemistry of Lakes*. 2. Aufl. Berlin [u.a.] (Springer): 279-328.

MOORE, P.D., WEBB, J.A. & Collinson, M.E. 1991: *Pollen Analysis*. 2. Aufl. Oxford [u.a.] (Blackwell).

MÜHLEISEN, R. 1977: Starkwinde an und auf dem Bodensee. *Meteorologische Rundschau* 30, Heft 1: 15-22.

MÜLLER, Erich R. 1979: Die Vergletscherung des Kantons Thurgau während der wichtigsten Phasen der letzten Eiszeit. *Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft* 43: 48-73.

MÜLLER, Erich R. 1982: Eisaufbau des wuermeiszeitlichen Rheingletschers in der Ostschweiz. *Physische Geographie*, Vol. 1: 221-236.

MÜLLER, Erich R. 1995: Neues zur Geologie zwischen Thur und Rhein. In: SCHLÄFLI, August (Hg.) 1995: *Die Nussbaumer Seen. Eine Naturmonographie*. Ittinger Schriftenreihe Bd. 5. Frauenfeld: 43-59.

MÜLLER, German 1968: Exceptionally High Strontium Concentrations in Fresh Water Onkolites and Mollusk Shells of Lake Constance. In: MÜLLER, G. & FRIEDMANN, F. (Hg.) 1968: *Recent Developments in Carbonate Sedimentology in Central Europe*. Berlin [u.a.] (Springer): 116-127.

MÜLLER, German 1969: High Strontium Contents and Sr/Ca-Ratios in Lake Constance Waters and their Sources in the Drainage Area of the Rhine River (Alpenrhein). *Mineral. Deposita* 4: 75-84.

MÜLLER, German 1997: Clear Constance. *Water Quality International* September / October 1997: 30-33.

MÜLLER, German & GASTNER, Manfred 1971: The „Karbonat-Bombe“, a simple device for the determination of the carbonate content in sediments, soils and other materials. *Neues Jahrbuch für Mineralogie/Monatshefte* 10: 466-469.

MÜLLER, German & QUAKERNAAT, Joost 1969: Diffractometric Clay Mineral Analysis of recent sediments of Lake Constance (Central Europe). *Contributions to mineralogy and petrology* 22: 268-275.

NEUKIRCH, Sibylle 1993: Phototrophe Pigmente und Mineralphasen in Seesedimenten - ein Zugang zu „frühen“ Umweltsignalen am Bodensee. *Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen* 64. Heidelberg.

NIESSEN, Frank, WICK, L., BONANI, G., CHONDROGIANNI, C. & SIEGENTHALER, C. 1992: Aquatic system response to climatic and human changes: productivity, bottom water oxygen status, and sapropel formation in Lake Lugano over the last 10000 years. *Aquatic Sciences* 54, 3/4: 257-276.

OSTENDORP, Wolfgang & BLUM, Hubert 1998: Hemmenhofener Methoden. Sedimentologische und paläolimnologische Methoden in der Siedlungsarchäologie. In: *Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 68, *Siedlungsarchäologie im Alpenvorland V*. Stuttgart (Theiss): 243-313.

PAZDUR, Anna, PAZDUR, M. F., GOSLAR, T., WICIK, B. & ARNOLD, M. 1994: Radiocarbon Chronology of Late Glacial and Holocene Sedimentation and Water-Level Changes in the Area of the Gościńskie Lake Basin. *Radiocarbon* Vol. 36, No. 2: 187-202.

RAMSEY, Bronk 1999: OxCal 3.3. Aktuelle Version unter:
http://www.rlaha.ox.ac.uk/orau/06_ind.htm

REIN, B. & NEGENDANK, J.F.W. 1993: Organic carbon contents of sediments from Lake Schalkenmehrener Maar: A Palaeoclimate indicator. In: NEGENDANK, J.F.W. & ZOLITSCHKA, B. (Hg.) 1993: *Palaeolimnology of European Maar Lakes. Lecture Notes in Earth Sciences* Vol. 49. Berlin [u.a.] (Springer): 163-171.

REINERTH, Hans 1953: Die mittlere Steinzeit am Bodensee. *Vorzeit am Bodensee* Heft 1/4: 1-32.

RIMATHÉ, R. 1987: Projekt Seebachtal, Ökologischer Fachbeitrag (unpubl.), Zürich. Zitiert in: GOLLNISCH-MOOS, Hartmut 1999: Ürschhausen-Horn Haus und Siedlungsstrukturen der spätestbronzezeitlichen Siedlung. *Archäologie im Thurgau* 7, *Forschungen im Seebachtal* 3. Frauenfeld (Amt für Archäologie).

ROBINSON, C., SHIMMIELD, G.B. & CREER, K.M. 1993: Geochemistry of Lago Grande Di Monticchio, S. Italy. In: NEGENDANK, J.F.W. & ZOLITSCHKA, B. (Hg.) 1993: *Palaeolimnology of European Maar Lakes. Lecture Notes in Earth Sciences* Vol. 49. Berlin [u.a.] (Springer): 317-332.

RÖSCH, Manfred 1983: Geschichte der Nussbaumer Seen (Kanton Thurgau) und ihrer Umgebung seit dem Ausgang der letzten Eiszeit aufgrund quartärbotanischer, stratigraphischer und sedimentologischer Untersuchungen. *Mitteilungen der thurgauischen naturforschenden Gesellschaft* 45.

RÖSCH, Manfred 1985: Nussbaumer Seen - Spät- und postglaziale Umweltveränderungen einer Seengruppe im östlichen schweizer Mittelland. *Dissertationes Botanicae*. 87: 337-379.

RÖSCH, Manfred 1993: Prehistoric land use as recorded in a lake-shore core at Lake Constance. *Vegetation history and archaeobotany* 2: 213-232.

RÖSCH, Manfred 1995: Geschichte des Nussbaumer Sees aus botanisch-ökologischer Sicht. In: SCHLÄFLI, August (Hg.) 1995: *Die Nussbaumer Seen. Eine Naturmonographie*. Ittinger Schriftenreihe Bd. 5. Frauenfeld: 43-59.

RÖSCH, Manfred 1997: Holocene sediment accumulation in the shallow water zone of Lower Lake Constance. *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 107, 4: 541-562.

SCHÄFER, Andreas 1972: Petrographische und stratigraphische Untersuchungen an den rezenten Sedimenten des Untersees/Bodensee. *Neues Jahrbuch für Mineralogie/Abhandlungen* 117/2: 117-142.

SCHÄFER, Andreas 1973: Zur Entstehung von Seekreide - Untersuchungen am Untersee (Bodensee). *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.*, H.4: 216-230.

SCHLICHTHERLE, Helmut 1985: Prähistorische Ufersiedlungen am Bodensee - Eine Einführung in naturräumliche Gegebenheiten und archäologische Quellen. *Materialhefte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 7, Berichte zu Ufer- und Moorsiedlungen Südwestdeutschlands 2: 9-42.

SCHLICHTHERLE 1988: Bemerkungen zur vorgeschichtlichen Besiedlung des Klosterplatzes. In: ZETTLER, Alfons 1988: *Die frühen Klosterbauten der Reichenau. Sigmaringen (Thorbecke)*: 317-324.

SCHLICHTHERLE, Helmut 1990 a: Siedlungen und Funde jungsteinzeitlicher Kulturgruppen zwischen Bodensee und Federsee. In: *Die ersten Bauern. Bd.2. Ausstellungskatalog 1990*. Zürich: 135-156.

SCHLICHTHERLE, Helmut 1990 b: Aspekte der siedlungsarchäologischen Erforschung von Neolithikum und Bronzezeit im südwestdeutschen Alpenvorland. In: *Siedlungsarchäologische Untersuchungen im Alpenvorland. Sonderdruck aus Bericht der Römisch Germanischen Kommission* 71. Mainz (Philipp von Zabern): 208-244.

SCHLICHTHERLE, Helmut 1995: Bemerkungen zur Siedlungsstruktur der Feuchtbodensiedlungen im südwestdeutschen Alpenvorland. In: ASPES, Alessandra (Hg.) 1995: *Modelli insediativi (Symposium Settlement patterns)*, Verona-Lazise 1992, *Mem. Museo Civ.St.Nat. Verona, Set. Scienze Uomo* 4: 251-259.

SCHLICHOTHERLE, Helmut 2001: Zur Besiedlung der Insel Reichenau von den Anfängen bis in vorklösterliche Zeit. In: UNTERMANN, M. (Red.) 2001: Klosterinsel Reichenau im Bodensee. UNESCO Weltkulturerbe. Landesdenkmalamt Baden-Württemberg Arbeitsheft 8: 147-155.

SCHLICHTING, Ernst, BLUME, H.-P., STAHR, K. 1995: Bodenkundliches Praktikum: eine Einführung für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler. Pareys Studentexte 81. Berlin [u.a.] (Blackwell).

SCHMIDLE, W. 1942: Postglaziale Spiegelhöhen des Bodensees und der Vorstoß des Konstanzer Gletschers. Schr. Ver. Gesch. Bodensee 68: 109-142.

SCHNEGG, Walter 1995: Zur Limnologie der Nussbaumer Seen. Mitteilungen der thurgauischen naturforschenden Gesellschaft 53: 115-145.

SCHÖBEL, Gunter 1996: Die Spätbronzezeit am nordwestlichen Bodensee. Taucharchäologische Untersuchungen in Hagnau und Unteruhldingen 1982-1989. In: Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 47. Siedlungsarchäologie im Alpenvorland IV. Stuttgart (Theiss): 9-202.

SCHÖTTLE, Manfred & MÜLLER, German 1968: Recent Carbonate Sedimentation in the Gnadensee (Lake Constance), Germany. In: MÜLLER, G. & FRIEDMANN, F. (Hg.) 1968: Recent Developments in Carbonate Sedimentology in Central Europe. Berlin [u.a.] (Springer): 148-156.

SCHREINER, Albert 1968: Untersuchungen zur Entstehung des Bodensees. Schr. Ver. Gesch. Bodensee 86: 283-294.

SCHREINER, Albert 1979: Zur Entstehung des Bodenseebeckens. Eiszeitalter und Gegenwart 29: 71-76.

SCHREINER, Albert 1992 a: Geologische Karte 1:50000 von Baden Württemberg: Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee. Freiburg, Stuttgart.

SCHREINER, Albert 1992 b: Einführung in die Quartärgeologie. Stuttgart (Schweizerbart).

SCHRÖDER, Heinz Gerd 1982: Biogene benthische Entkalkung als Beitrag zur Genese limnischer Sedimente. Beispiel: Attersee (Salzkammergut; Oberösterreich). Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fachbereiche der Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.

SCHRÖDER, R. 1974: Strömungsverhältnisse im Bodensee-Untersee und der Wasseraustausch zwischen den einzelnen Seebecken. Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee Bericht Nr. 15.

STATHER, Hans 1986: Die römische Militärpolitik am Hochrhein unter besonderer Berücksichtigung von Konstanz. Konstanzer Dissertationen 100. Konstanz (Hartung-Gorre).

STATHER, Hans 1993: Der römische Hegau. Hegau-Bibliothek Bd. 89. Konstanz (Hartung-Gorre).

STRAHM, Christian 1987: Zur Einführung. Das Forschungsvorhaben: „Siedlungsarchäologische Untersuchungen im Alpenvorland“. In: Siedlungsarchäologische Untersuchungen im Bodenseeraum, Nachdruck der Archäologischen Nachrichten aus Baden 38/39, 1987: 4-10.

STUIVER, Minze, REIMER, P. J., BARD, E., BECK, W. J., BURR, G.S., HUGHEN, K. A., KROMER, B., McCORMAC, G., VAN DER PLICHT, J., SPURK, M. 1998: INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24000-0 cal BP. Radiocarbon Vol. 40, No. 3: 1041-1083.

SWAN, A.R.H. & SANDILANDS, M. 1995: Introduction to geological data analysis. Oxford [u.a.] (Blackwell).

TANNER, H. 1913: Der Hüttwiler- oder Steineggersee. Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft 20: 169-226. Zitiert in: RÖSCH, Manfred 1985: Nussbaumer Seen - Spät- und postglaziale Umweltveränderungen einer Seengruppe im östlichen schweizer Mittelland. Dissertationes Botanicae 87: 337-379.

TESDORPF, Jürgen C. 1972: Die Entstehung der Kulturlandschaft am westlichen Bodensee. Veröffentlichungen der Kommission für Geschichtliche Landeskunde in Baden-Württemberg Reihe B Bd. 72.

THOMPSON, R. & KELTS, K. 1974: Holocene sediments and magnetic stratigraphy from Lakes Zug and Zurich, Switzerland. Sedimentology 21: 577-596.

TUREKIAN, K.K. & WEDEPOHL, K.H. 1961: Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Geological Society of America bulletin 72: 175-192.

VASSILJEV, Jüri, HARRISON, S. P. & GUIOT, J. 1998: Simulating the Holocene Lake-Level Record of Lake Bysjön, Southern Sweden. Quaternary Research 49: 62-71.

VOGT, Richard (in Vorber.): Untersuchungen zu Kolluvien als Archive für einen anthropogen ausgelösten Landschaftswandel.- Stuttgarter Geographische Studien.

WAGNER, Günther A. 1995: Altersbestimmung von jungen Gesteinen und Artefakten. Stuttgart (Enke).

WAIBEL, K. 1968: Witterung und Klima. In: Staatliche Archivverwaltung Baden-Württemberg in Verbindung mit dem Landkreis Konstanz (Hg.) 1968: Der Landkreis Konstanz, Amtliche Kreisbeschreibung Bd. 1. Sigmaringen (Thorbecke): 104-149.

WESSELS, Martin 1995: Bodensee-Sedimente als Abbild von Umweltveränderungen im Spät- und Postglazial. Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie Nr. 66. Göttingen.

WINIGER, Josef & HASENFRATZ, Albin 1985: Ufersiedlungen am Bodensee. Antiqua 10.

YU, Ge 1996: Lake-level records and palaeoclimates of northern Eurasia. LUNDQUA THESIS 37. Lund (Lund University, Department of Quaternary Geology).

YU, Ge & HARRISON, Sandy P. 1995: Lake status records from Europe: Data base documentation. NOAA Paleoclimatology Publications Series Report 3, Boulder: 1-451. Auch im Internet: <ftp.ngdc.noaa.gov>

6 Anhang

6.1 Methodik

6.1.1 Probenahme

Am Nussbaumer See wurde zur Aufnahme der Stratigraphie in einigen Fällen ein Kammerbohrer benutzt (s. Kap. 2.1.1). Alle weiteren Bohrkerne wurden mit einem Stechrohrbohrgerät nach MERKT & STREIF 1970 entnommen. Die Kerne wurden, sofern notwendig sofort, spätestens nach wenigen Tagen aus den Metallhülsen heraus auf Kunststoffhalbschalen gepresst. Diese wurden, wie die mit dem Kammerbohrer entnommenen Kerne, anschließend mit Frischhaltefolie verpackt und bis zur weiteren Bearbeitung in einem Keller bei wenig schwankender Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit gelagert.

Die Bohrkerne aus dem Gnadensee wurden ebenfalls mit einem nach MERKT & STREIF 1970 konstruierten Stechrohrbohrgerät, im Gegensatz zum Nussbaumer See aber mit innenliegendem PP-Liner, abgeteuft. Eine genaue Beschreibungen des verwendeten Gerätes ist bei OSTENDORP & BLUM 1998 zu finden. Die PP-Liner wurden bis zur Beprobung verschlossen gelagert. Das Öffnen der Kerne ist ebenfalls bei OSTENDORP & BLUM 1998 beschrieben. Verpackung und weitere Lagerung s.o.

Anschließend wurden die Kerne beschrieben (ggf. vorher mit einem Messer geputzt) und fotografiert.

Die einzelnen Proben wurden mit einem Messer und einer Kunststoffspachtel entnommen. Für die Entnahme der Proben zur Spurenelementanalyse kamen ausschließlich Kunststoffgeräte zur Anwendung.

6.1.2 Magnetische Suszeptibilität

Die magnetische Suszeptibilität (dimensionslos) ist ein Maß für die Magnetisierbarkeit eines Stoffes (WESSELS 1995). Sie ist der Proportionalitätsfaktor zwischen der Feldstärke eines von außen auf eine Probe einwirkenden magnetischen Feldes und der dadurch in der Probe induzierten Magnetisierung (DE WALL 1998, OSTENDORP&BLUM 1998).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Suszeptibilitätsmessung jeweils mit einem Messgerät der Firma Bartington am ganzen Kern durchgeführt. Da einige Bohrkerne aus dem Nussbaumer See einen Durchmesser von 80 mm haben, wurden sie bei der BGR mit einem Messaufbau aus feststehender Spule (Durchmesser 90 mm) und fahrbarem Kernschlitten analysiert (Herrn Dr. von Stackelberg, Herrn Dr. M. Weber und den Technikern sei hier vielmals für die Bereitstellung des Gerätes und Ihre hervorragende Unterstützung gedankt). Das Messintervall betrug 1 cm.

Die Kerne aus dem Gnadensee (Durchmesser 50 mm) wurden am Limnologischen Institut der Universität Konstanz mit einem Messaufbau aus fahrbarer Spule (Durchmesser 60 mm) und feststehendem Kern untersucht (Herrn Prof. Rothaupt sei an dieser Stelle für die Bereitstellung, Herrn Dr. M. Wessels für die Einweisung und dem technischen Personal für die Instandhaltung des Gerätes gedankt). Wegen der beweglichen Spule muß die Messung korrigiert werden. Deshalb wurde an jedem Messtag vor und nach den eigentlichen Messungen eine „Raumkurve“ (Messung ohne Kern) aufgezeichnet. Um die korrigierte Messkurve zu erhalten, wurden diese zwei Raumkurven gemittelt und die Mittelwerte von den Daten der Messkurven abgezogen. Das Messintervall betrug auch hier 1 cm.

6.1.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die REM-Untersuchungen erfolgten mit einem Rasterelektronenmikroskop der Firma „Leo“. Die qualitativen Elementbestimmungen im Rahmen der REM-Analysen erfolgten mit dem EDX-System „LinkIsis 300“ der Firma „Oxford“. Die Proben wurden mit Gold bedampft, für die EDX-Analysen mit Kohlenstoff.

6.1.4 Partikelanalyse

Die Partikelanalyse dient, neben der deskriptiven Inventarisierung der Sedimentpartikel, der Rekonstruktion von Seespiegelschwankungen. Diese Methode stützt sich auf Karbonatkonkretionen, die biochemisch in Hartwasserseen gebildet werden.

Bereits 1982 beschreiben BROCHIER & JOOS (1982) die unterschiedlichen Konkretionen in den Litoralsedimenten des Neuenburger Sees ohne den einzelnen Konkretionstypen ein bestimmtes Bildungsmilieu zuzuordnen. SCHRÖDER, H.G. (1982) beschreibt fünf, BEHBEHANI (1987) sieben verschiedene Typen röhrenförmiger Konkretionen in Seen des Salzkammergutes. BEHBEHANI (1987) ordnet die Entstehung stärker verkalkter Röhrrchen einer Wassertiefe von 3-6 m zu. In der hier vorliegenden Studie konnten röhrenförmige Konkretionen nicht klassifiziert werden. MAGNY (1992 a, b) entwickelt anhand von Oberflächenproben verschiedener Seen (vorwiegend im Jura) ein Bildungs- und Sedimentationsmodell für die Kalkkonkretionen (Abbildung 42).

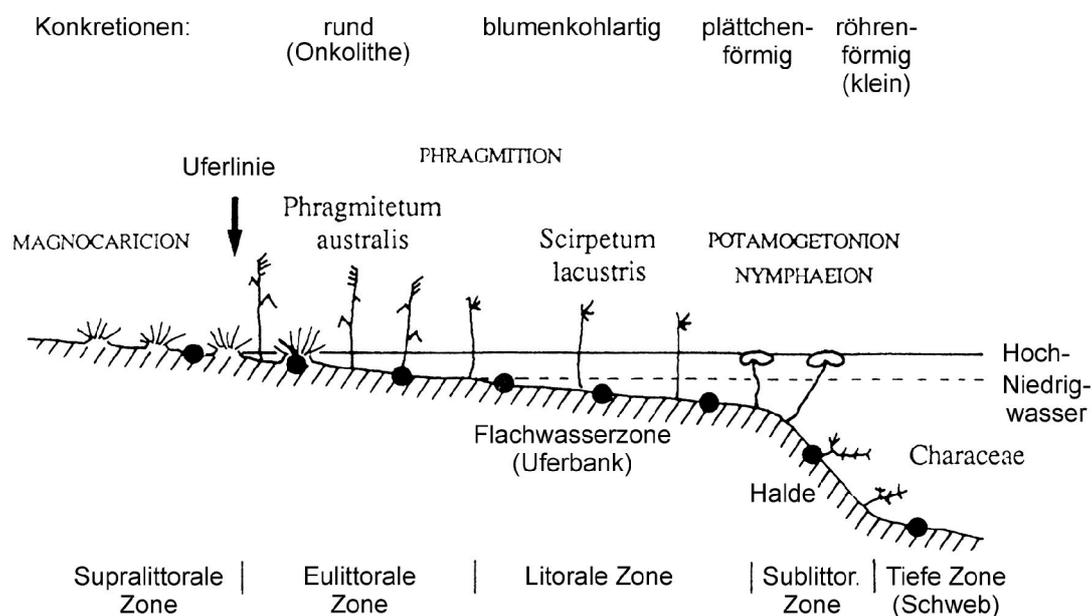


Abbildung 42: Ufergliederung eines idealisierten (Jura)Sees mit der Verteilung der Vegetation und den sedimentierten Konkretionen. Nach MAGNY 1992 b, verändert. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Die Kalkkonkretionen entstehen durch Umkrustung von Wasserpflanzenteilen (biochemische Calcitfällung). Die Wasserpflanzen bilden im See konzentrische Gürtel mit typischen Arten-

assoziationen (MAGNY 1992 b). Somit sind die an bestimmten Pflanzenarten gebildeten Kalkkonkretionen dem zugehörigen Lebensraum der Pflanze zuzuordnen. Kalkkonkolithe (= runde Konkretionen) sind typisch für ufernahes Flachwasser, blumenkohlartige Kalkkonkretionen für die Uferbank, plättchenförmige Konkretionen für die Haldenkante und kleine röhrenförmige Konkretionen für die Halde selbst (MAGNY 1992 a, b). Große röhrenförmige Konkretionen kommen in der gesamten Flachwasserzone vor (MAGNY 1992 a, b). Werden nun die Veränderungen der Anteile der Konkretion innerhalb eines Bohrkernes untersucht, so kann man unter Berücksichtigung der normalen Verlandung eines Sees Aussagen zu relativen Wasserspiegeländerungen machen. Weitere Hinweise zum Seespiegel kann die Molluskenmenge (d.h. hier Schill und Operculi) und die organische Substanz liefern: die Anzahl der Mollusken nimmt zum Ufer hin zu, mehr organische Substanz weist auf flaches Wasser hin (MAGNY et al. 1995 sowie frendl. mündl. Mitteilung Dr. M. Magny).

In den in dieser Arbeit beschriebenen Partikeluntersuchungen wurde zunächst die Fraktion 0,2-0,63 mm des Kern NBS L2 untersucht. Zuvor war das Sediment mit einer Siebmaschine (Firma Retsch) nass gesiebt worden (>2 mm, 0,63-2 mm, 0,2-0,63 mm, 0,2-0,063 mm sowie 0,002-0,063 mm an ausgewählten Proben). Angerundete Konkretionen wurden in dieser ersten Untersuchungsreihe zu den „runden Konkretionen“ (=Onkolithe), plättchenförmige Zusammenballungen feinsten Partikel zu den „plattigen Konkretionen“ gezählt. Im Laufe der Untersuchung und durch Diskussion mit Dr. M. Magny, zeigte sich, dass die eben beschriebenen Konkretionen zu den „eckigen Konkretionen“ (nicht weiter zu klassifizierende Kalkkonkretionen) zu zählen sind. Sowohl die angerundeten Konkretionen als auch die plättchenförmigen Zusammenballungen feinsten Partikel entstehen nicht durch Wasserpflanzen, sondern wahrscheinlich durch die Probenaufbereitung.

Die Fraktion 0,2-0,63 mm ist nicht uneingeschränkt zur Rekonstruktion der Wasserspiegel geeignet, da hier blumenkohlartige Konkretionen und Oogonien überrepräsentiert sind (mündl. Mitteilung Dr. M. Magny).

Die Probenaufbereitung mußte ebenfalls modifiziert werden, da die plättchenförmigen und blumenkohlartigen Partikel durch den Einsatz der mechanischen Siebmaschine zerstört werden könnten.

Für die weiteren Untersuchungen wurde das Sediment in einem Liter Leitungswasser („hart“) über Nacht langsam über Kopf geschüttelt und anschließend von Hand nass gesiebt („geschlämmt“). Dazu wurde die Suspension in den Siebturm (>2 mm, 0,63-2 mm, 0,5-0,63 mm, 0,2-0,5 mm, 0,063-0,2 mm,

<0,063 mm) geschüttet und anschließend jedes Sieb mit schwachem Wasserstrahl abgebraust. Der Rückstand wurde in vorgewogene Filter (getrocknet bei 105°C) überführt, bei 105°C über Nacht getrocknet und anschließend ausgewogen. Auch durch diese Probenaufbereitung entstanden Artefakte: durch das Schütteln zum Dispergieren der Probe ballten sich Partikel <0,063 mm zusammen oder waren bereits verbacken und wurden durch die Bewegung im Wasser zu gerundeten Konkretionen. Diese sind aufgrund ihrer dunkleren Farbe und ihrem frischeren Aussehen von den eigentlichen runden Konkretionen zu unterscheiden. Zerkleinern „runde (Artefakt-)Konkretionen“, entstehen „eckige (Artefakt-)Konkretionen“. Diese wurden folglich zu den eckigen Konkretionen gezählt, weil eine Unterscheidung nur in Einzelfällen möglich ist. Ausgezählt wurden die Fraktionen 0,5-0,63 mm und 0,63-2 mm, die Mengenverhältnisse der Hauptbestandteile der Fraktion 0,2-0,5 mm wurden abgeschätzt. Zum Auszählen wurde die Probe (bei zu großer Menge ein repräsentativer Teil) in eine Zählchale geschüttet und mit Hilfe eines Haarpinsels zufällig und gleichmäßig über die Fläche verteilt. Anschließend wurde die Schale reihenweise bis zum Erreichen einer Partikelzahl von mindestens 600 (sofern vorhanden) ausgezählt, um eine statistisch sinnvolle Aussage treffen zu können (in Anlehnung an die Pollenanalyse nach MOORE & COLLINSON 1991, FAEGRI & IVERSEN 1989). Die Aussagefähigkeit nimmt mit sinkendem Anteil einer Partikelklasse ab (FAEGRI & IVERSEN 1989) und gibt bei Anteilen unter 5% nicht mehr als einen Trend wieder. Eine empirische Überprüfung der notwendigen Gesamtpartikelzahl ist in Abbildung 43 zu sehen. Hier sind die Zwischenergebnisse einer repräsentativen Probe aus Bohrkern NBS L2 dargestellt. Die Verhältnisse der Hauptkomponenten verändern sich bereits ab 200 Partikeln nur noch

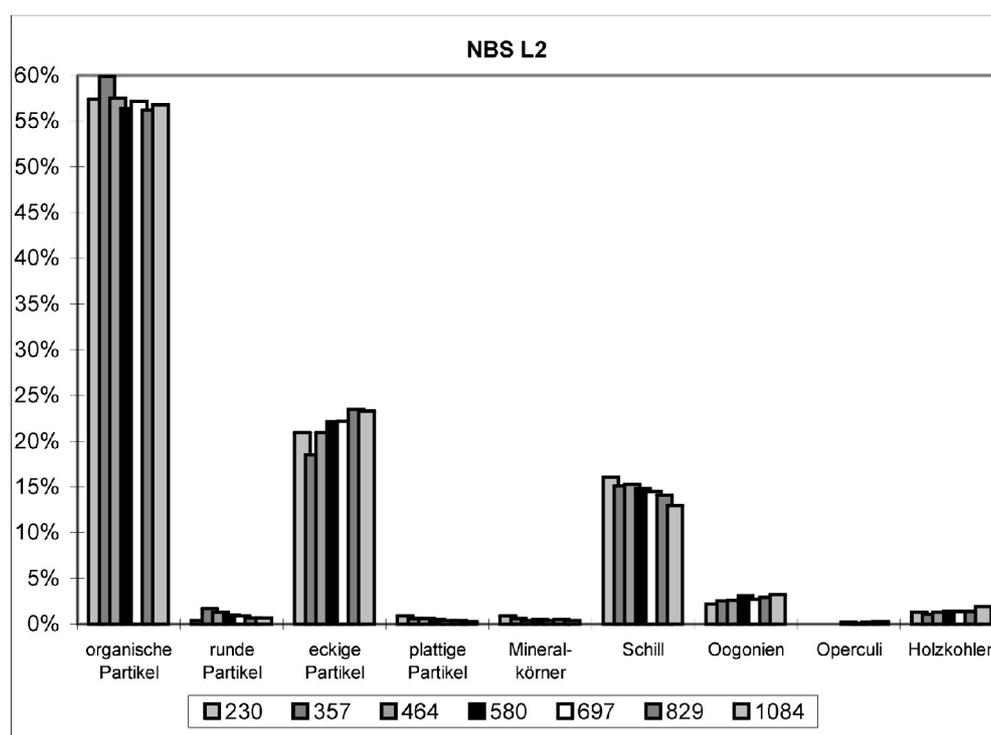


Abbildung 43: Partikelanteile bei verschiedener Gesamtpartikelanzahl. Die unterschiedlichen Balken entsprechen den in der Legende angegebenen Gesamtpartikelzahlen. (Probe NBS L2 8, 0,5-2 mm, Aufbereitungszyklus II)

unwesentlich, die der Nebenkomponten ab etwa 600 Teilchen. Dabei können mit steigender Gesamtzahl aber immer noch relevante Veränderungen auftreten, sodass der absolute Fehler bei Komponenten mit einem Anteil unter 5% groß ist. Eine bessere statistische Absicherung der Aussagen zu Wasserspiegelschwankungen (die relevanten Konkretionen liegen oft zwischen 2% und 10%) ist wegen der vorhandenen geringen Materialmenge und der darin enthaltenen Anzahl an Konkretionen nicht möglich.

Um die Ergebnisse der ersten Untersuchungsreihe verwenden zu können, wurden ausgewählte Proben auch im zweiten Aufbereitungszyklus bearbeitet und die Zählergebnisse beider Untersuchungsreihen miteinander verglichen (s. Kap. 2.3.1).

6.1.5 Röntgendiffraktometrie

Die röntgendiffraktometrischen Untersuchungen wurden mit dem Gerät D500 der Firma Siemens und der Standardsoftware „Diffrac“ durchgeführt. Es wurde bei allen Messungen Kupfer- $K\alpha$ -Strahlung verwendet (40 kV, 20 mA). Zunächst wurde der Bereich von $5-65^\circ 2\theta$ abgescannt. Zur Abschätzung des Mengenverhältnisses der Mineralphasen zueinander wurden jeweils die auf den Diagrammen gemessene Peakhöhe des stärksten Reflexes benutzt (Ausnahme NBS L2: hier wurden aufgrund technischer Probleme die zweitstärksten Reflexe vermessen).

Untersuchung der Tonminerale:

Die Proben wurden mit 4%iger Essigsäure (für NBS L2 gilt: 50%ige Essigsäure) entkalkt, abzentrifugiert (1h, 5050 Umdrehungen/min) und drei Mal mit vollentsalztem Wasser gewaschen, dazwischen jeweils abzentrifugiert (für NBS L2 gilt: 5 Mal waschen, zentrifugieren je 3 min). Der Rückstand wurde in destilliertem Wasser suspendiert und es wurde jeweils ca. 1 ml der Suspension auf einen Glaträger aufgebracht. Die so bei Raumtemperatur eingedampften Texturpräparate wurden im Bereich von $2-30^\circ 2\theta$ gemessen. Die längere Zentrifugierzeit der Proben aus dem Gnadensee sorgte für ein quantitatives Absetzen der Tonminerale, dies ist bei den Proben aus dem Nussbaumer See nicht der Fall. Dieser Unterschied hat auf die (qualitativen) Aussagen des Ergebnisses keinen Einfluß; eine halbquantitative Auswertung der Proben war nicht angestrebt. Nach dem Entkalken und erstmaligem Messen wurden die selben Präparate (ausgenommen NBS L2) zusammen mit einer Schale Ethylenglycol bei 60°C über Nacht in einen Wärmeschrank gestellt. Durch den Ethylenglycoldampf quellen möglicherweise vorhandene quellfähige Tonminerale auf. Dadurch werden die Gitterabstände größer und die Basisreflexe würden zu höheren 2θ -Werten hin verschoben. Anschließend wurden die so behandelten Präparate wieder der bereits beschriebenen Messroutine unterworfen und deren Ergebnisse mit den Ergebnissen ohne Ethylenglycolbehandlung verglichen.

6.1.6 Glühverlust

Zur Bestimmung des Glühverlustes wurden rund 0,5 g der bei 105°C getrockneten Probe in einen vorgeglühten Porzellantiegel eingewogen. Anschließend wurde die Probe bei 550°C 2h im Muffelofen geglüht.

Der Glühverlust ist ein Maß für den Gehalt an organischer Substanz (z.B. SCHLICHTING et al. 1995). Aufgrund der Fehlerquellen bei der Bestimmung schlagen die selben Autoren einen Vergleich mit einer zweiten Bestimmungsmethode vor.

Dies ist über den C_{org} -Gehalt möglich. Um von den C_{org} -Werten zum Gehalt an organischer Substanz zu gelangen, muß man den durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt der organischen Substanz berücksichtigen. In der Bodenkundlichen Kartieranleitung (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN ... 1996) wird ein Korrekturfaktor von 1,72 für Böden und ein Faktor von 2 für Torfe und Auflagehumus angegeben. SCHLICHTING et al. (1995) geben den Faktor 2 an. In Abbildung 44 ist der Glühverlust gegen den mit dem Faktor 2 multipliziertem C_{org} -Gehalt der Messungen an den Kernen aus dem Nussbaumer See aufgetragen. Die lineare Trendlinie verdeutlicht die gute Übereinstimmung der beiden Methoden, wobei der Glühverlust zu geringfügig höheren Werten tendiert.

Da bereits dieser Umrechnungsfaktor einen nicht genauer zu bestimmenden Fehler birgt, ist ein Unterschied der beiden Methoden von relativ 20% tolerierbar.

An den Kernen NBS K1, NBS W2, NBS L12, L13, L2 und L16 konnte entweder keine Gesamtkohlenstoffmessung oder keine Karbonatbestimmung durchgeführt werden. Deshalb wurden hier die Gehalte an C_{org} durch Halbierung des Glühverlustes berechnet.

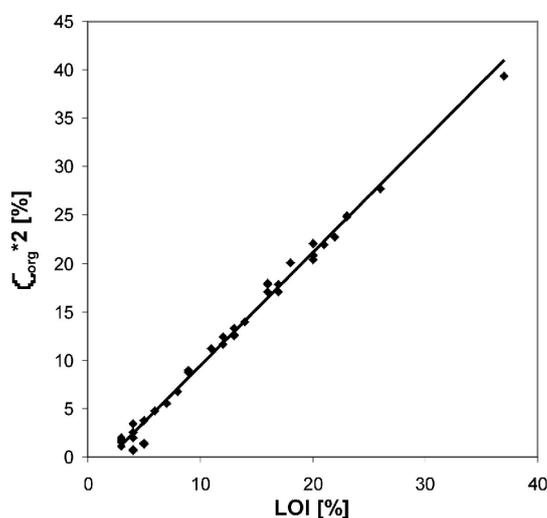


Abbildung 44: Vergleich zweier Methoden zur Bestimmung des organischen Gehaltes: LOI aufgetragen gegen den mit dem Faktor 2 multiplizierten Gehalt an organischem Kohlenstoff mit Trendlinie. Analysen aller Kerne. Weitere Erläuterungen siehe Text.

6.1.7 Karbonatbestimmung

Karbonate wurden direkt mit der Karbonatbombe (MÜLLER & GASTNER 1971) bestimmt und dabei als Calcit betrachtet. Dies ist aufgrund der röntgenographischen Untersuchungen zulässig. Die Karbonatbombe wurde jeweils mit CaCO_3 99,5% kalibriert, Doppelbestimmungen wurden als Stichproben durchgeführt und zusätzlich bei einer signifikanten Abweichung eines Messwertes von den im Kern direkt benachbarten Messwerten.

Vergleich der Karbonatbestimmungen

Da Ca neben der Messung mit der Karbonatbombe auch mit der RFA bestimmt wurde, können beide Methoden miteinander verglichen werden. Die RFA-Werte könnten höher ausfallen, da hier auch Ca, das nicht als CaCO_3 gebunden ist, mitgemessen wird. Die Messungen mit der Karbonatbombe könnten dann höher ausfallen als die der RFA, wenn ein Dolomitgehalt der Probe nachweisbar ist.

Betrachtet man nun das Histogramm der Differenzen beider Messreihen (Abbildung 45), so erscheinen die Werte bis auf wenige Ausreißer normalverteilt. Das bedeutet, dass die Differenzen zufällig um den Wert 0 schwanken, was wiederum heißt, dass die Werte (mit einem mittleren Fehler von 2,8 bzw. 0, wenn der Median benutzt wird, und einer Standardabweichung von 7,5) gleich sind. In NBS K1 zeigen sich die Grenzen der Karbonat- und Glüh-

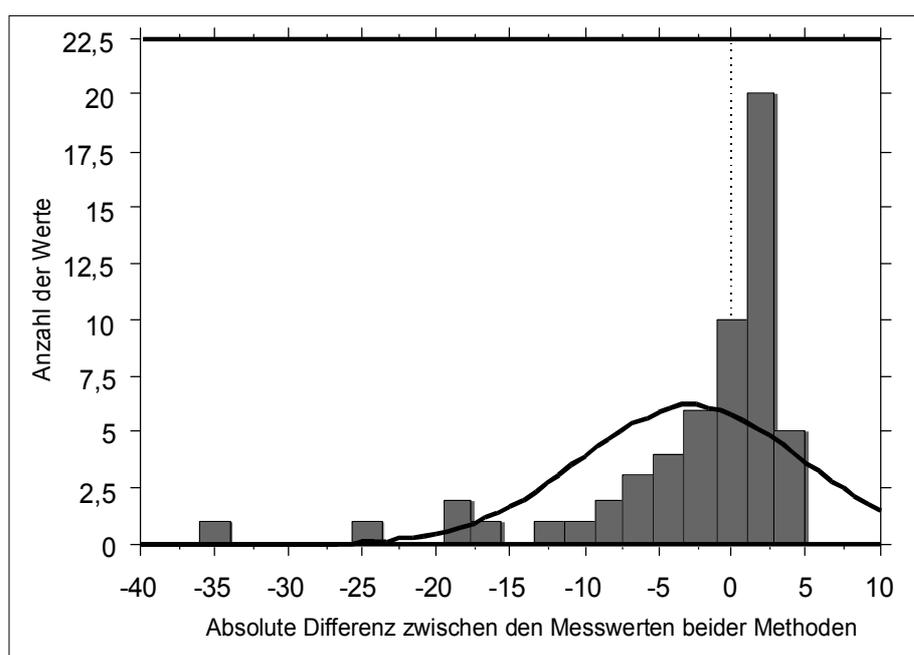


Abbildung 45: Histogramm der Differenzen zwischen den mit der Karbonatbombe ermittelten Calciumkarbonatgehalten und den aus der RFA-Messung berechneten Werten. Zum Vergleich eine Normalverteilung.

verlustbestimmung: obwohl der Karbonatgehalt 100% erreicht, sinkt der Glühverlust nicht unter 3%. Dieser Fehler von max. 4% in der Gesamtsumme läßt sich durch den Fehler der beiden Analysemethoden und durch geringe Inhomogenitäten zwischen den Teilproben erklären.

6.1.8 Kohlenstoff- und Schwefelmessungen

Gesamtkohlenstoff und Schwefel wurden parallel mit dem Carbon-Sulfur-Determinator CS-225 der Firma Leco bestimmt. Dabei wurde rund 0,01 g Probe mit Eisenpellets vermengt und in einem Hochfrequenz-Induktionsofen verbrannt. Anschließend detektiert das Gerät Kohlenstoff und Schwefel spektroskopisch im Infrarot-Bereich. Das Gerät wurde regelmäßig mit dem mitgelieferten Standard ($C=3,29\pm 0,02\%$ und $S=0,048\pm 0,003\%$) kalibriert. Doppelbestimmungen wurden immer durchgeführt, bei Differenzen des Kohlenstoffgehaltes der Doppelbestimmung $>0,2\%$ absolut wurde eine dritte Messung durchgeführt. Die Werte wurden gemittelt, „Ausreißer“ blieben dabei unberücksichtigt.

Der organisch gebundene Kohlestoff (C_{org}) kann aus dem Gesamtkohlenstoff abzüglich dem im Karbonat (hier nur $CaCO_3$, s. Kap. 6.1.7) gebundenen Kohlenstoff berechnet werden.

6.1.9 Haupt- und Spurenelementanalysen

Haupt- und Spurenelementkonzentrationen wurden mit der Röntgenfluoreszenz-Analyse bestimmt. Dabei wurden die Hauptelemente aus einer Schmelztablette (600 mg der bei $1200^\circ C$ geglühten Probensubstanz und 3600 mg des Flussmittels Spektroflux 100), die Spurenelemente aus einer Presstablette gemessen.

Die Messungen der Proben des Kernes NBS L2 erfolgten mit einem ersten Satz selbst hergestellter Standards. Dabei zeigte sich ein Fehler durch den Wassergehalt des stark hygroskopischen CaO. Deshalb wurden alle weiteren Messungen mit einem zweiten Satz selbst erstellter Standards kalibriert. Zusätzlich wurde eine Referenzprobe analysiert. Die Vergleiche der beiden Standardreihen sowie die Absicherung mit dem Referenzmaterial werden in den nächsten Abschnitten beschrieben.

Vergleich der RFA-Messungen mit unterschiedlichen Standards

Zur Herstellung der ersten Standardreihe wurde als CaO-Komponente CaO benutzt, das aber wegen seiner hygroskopischen Eigenschaft auch bei 105°C nicht vollständig getrocknet werden konnte (s.o., für die zweite Standardreihe wurde CaCO₃ verwendet). Die Analyseergebnisse liegen somit zu hoch; dies macht sich aufgrund deren hohen Konzentrationen am meisten bei SiO₂ und CaO bemerkbar. Um die Fehlergröße besser einschätzen zu können, wurden sechs repräsentative Proben mit dem zweiten Satz der Standards nachgemessen. Die Messergebnisse sind Kapitel 6.2 zu entnehmen. In Tabelle 13 sind die Werte der ersten Messreihe von denen der zweiten abgezogen. Negative Zahlen bedeuten somit ein höheres Messergebnis bei Verwendung des ersten Standardsatzes, positive Zahlen ein niedrigeres Ergebnis. Sind die jeweiligen Messwerte innerhalb des Fehlerbereichs gleich, so wurde keine Eintragung in die Tabelle vorgenommen. Die Fehlerbereiche sind in der letzten Zeile der Tabelle dargestellt.

Tabletten Nr.	Tiefe [cm]	SiO ₂ [%]	CaO [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	Al ₂ O ₃ [%]
75	8-10	0,17	-18,56	0,03	
76	13-15	0,18	-18,5	0,04	
88	19-21		-23,38	0,04	
104	26-28	0,14	-18	0,04	
80	30-32	0,14	-17,67	0,07	0,026
63	39-41	0,17	-18,13	0,05	
Fehler absolut ±		0,05	1		0,005

Tabletten Nr.	Tiefe [cm]	MgO [%]	MnO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	P ₂ O ₅ [%]
75	8-10	-0,053		0,108		-0,006
76	13-15	0		0,076		
88	19-21	-0,1	0	0,066	0	
104	26-28	0		0,101	0,01	0,017
80	30-32	-0,046		0,079	0,007	0,014
63	39-41	-0,086	-0,010	0,079	0,009	
Fehler absolut ±		0,005	0,005	0,05	0,005	5

Tabelle 13: Differenz zwischen RFA-Messwerten unter Verwendung verschiedener Standardsubstanzen. Weitere Erläuterungen siehe Text.

Die Gesamtsumme der Messung der Gnadensee-Proben lag generell etwas zu hoch, war aber vertretbar. Um diesen Fehler auszugleichen, wurden die Messwerte auf 100% normiert.

Die MgO-Werte der Referenzsubstanz sind reproduzierbar im Mittel um den Faktor 1,15 höher als der vom Hersteller empfohlene Wert. Da der empfohlene Wert aufgrund der vom Hersteller durchgeführten Analysen als richtig anzunehmen ist, wurde bei allen mit der zweiten Standardreihe gemessenen Proben MgO um den entsprechenden Faktor korrigiert.

Bei K₂O liegen die Messwerte um einen Faktor von ungefähr 10 unter dem für die Referenzsubstanz angegebenen Wert. Da dieser Wert von den Herstellern der Substanz aber nur „vorgeschlagen“ ist (im Gegensatz zu „empfohlen“), seine Verlässlichkeit somit nicht einzuschätzen ist, wurde hier keine Korrektur durchgeführt.

Die Verteilung der Hauptelemente zwischen der Gesamtsubstanz und der Fraktion kleiner 20 µm: In der Regel wurden die Untersuchungen an der Gesamtsubstanz durchgeführt. Am Bohrkern L2 wurden an drei ausgewählten Proben die Hauptelemente in der Fraktion < 20 µm und in der Gesamtsubstanz bestimmt. Tabelle 14 zeigt das Verhältnis des jeweiligen Elementes aus der Gesamtsubstanz zu seinem Gehalt in der Fraktion < 20 µm.

Silizium und Aluminium weisen in der Fraktion < 20 µm um etwa 20% höhere Werte als in der Gesamtfraktion auf. In ähnlicher Konzentration kommen Calcium, Eisen und Magnesium in beiden Fraktionen vor; auf Unterschiede zwischen den Proben muß hier hingewiesen werden. Phosphor und Mangan sind in allen drei Proben in der Fraktion < 20 µm um 1/10 bzw. 1/3 höher als in der Gesamtfraktion konzentriert. Bei Kalium läßt sich keine eindeutige Aussage über die Verteilung zwischen den Fraktionen machen.

	Tiefe	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O _{3,t}	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
gesamt/<20 µm	8-10	0,71	1,00	0,91	0,68	0,99	0,72	0,83	0,32	0,90
gesamt/<20 µm	13-15	0,82	1,03	0,81	0,74	1,04	0,75	0,92	0,82	0,83
gesamt/<20 µm	30-32	0,89	0,77	0,99	0,79	0,73	0,73	0,63	0,59	0,81

Tabelle 14: Verteilungsfaktoren zwischen Gesamtsubstanz und Fraktion kleiner 20 µm. Kursiv gedruckte Faktoren weichen um mindestens 0,1 vom nächsthöheren bzw. -niederen Wert ab.

6.2 Tabellen

6.2.1 Daten der Bohrkern

Gebiet	Kern	GOK	Rechtswert	Hochwert	Kernlänge
BDS	Gn1	394,45 m ü.NN	3499834	5289262	197 cm
BDS	Gn2	393,94 m ü.NN	3499724	5289171	1119 cm
BDS	Gn3	393,17 m ü.NN	3499647	5289125	829 cm
BDS	Gn4	392,02 m ü.NN	349943	5289121	819 cm
BDS	Gn5	391,09 m ü.NN	3499638	5289119	814 cm
BDS	Gn6	390,04 m ü.NN	3499636	5289115	828 cm
BDS	Gn7	391,61 m ü.NN	3506410	5283615	1038 cm
NBS	K1	434,91 m ü. M.	703530	274809	100 cm
NBS	L10	434,42 m ü. M.	703633,1	274706,6	62 cm
NBS	L11	434,59 m ü. M.	703630	274703	435 cm
NBS	L12	435,16 m ü. M.	703626	274700	300 cm
NBS	L13	435,74 m ü. M.	703622,6	274696,8	130 cm
NBS	L14	435,56 m ü. M.	703618,5	274693,5	400 cm
NBS	L16	435,36 m ü. M.	703610,6	274686,8	300 cm
NBS	L2	435,31 m ü. M.	703615	274690	400 cm
NBS	W1	432,24 m ü. M.	703640,1	274713,7	214 cm
NBS	W2	431,19 m ü. M.	703647,2	274720,8	405 cm
NBS	W3	429,89 m ü. M.	703654,3	274727,9	407 cm
NBS	W4	428,89 m ü. M.	703795,9	274870,6	527 cm

Kern	OK_Probe	UK_Probe												
L12	17,5	18,5	L16	41	43	W2	114,5	115,5	W3	226,5	227,5	W4	175,5	176,5
L12	21,5	22,5	L16	46	48,5	W2	115,5	116,5	W3	229,5	230,5	W4	177,5	178,5
L12	24,5	25,5	L16	48,5	49,5	W2	116,5	117,5	W3	231,5	232,5	W4	178,5	179,5
L12	25,5	26,5	L16	49,5	50,5	W2	117,5	118,5	W3	232,5	233,5	W4	179,5	180,5
L12	27,5	28,5	L16	50,5	52	W2	118,5	119,5	W3	233,5	234,5	W4	181,5	182,5
L12	29,5	30,5	L16	53	55	W2	119,5	120,5	W3	236,5	237,5	W4	182,5	183,5
L12	31,5	32,5	L16	55	56,5	W2	120,5	121,5	W3	239,5	240,5	W4	183,5	184,5
L12	32,5	33,5	L16	56,5	57,5	W2	121,5	122,5	W3	241,5	242,5	W4	185,5	186,5
L12	34,5	35,5	L16	57,5	58,5	W2	122,5	123,5	W3	243,5	244,5	W4	187,5	188,5
L12	36,5	37,5	L16	58,5	60	W2	124,5	125,5	W3	245,5	246,5	W4	189,5	190,5
L12	38	39	L16	60	61	W2	125,5	126,5	W3	248,5	248,5	W4	189,5	191,5
L12	39,5	40,5	L16	61	62	W2	126,5	127,5	W3	251,5	251,5	W4	191,5	192,5
L12	41	42	L16	64	65	W2	127,5	128,5	W3	253	254	W4	193,5	194,5
L12	42,5	43,5	L16	66	67,5	W2	128,5	129,5	W3	254,5	255,5	W4	195,5	196,5
L12	44,5	45,5	L16	67,5	69,5	W2	129,5	130,5	W3	257,5	257,5	W4	197,5	198,5
L12	45,5	46,5	L16	69,5	70,5	W2	130,5	131,5	W3	258,5	259,5	W4	199,5	200,5
L12	47,5	48,5	L16	72	74	W2	131,5	132,5	W3	260,5	261,5	W4	201,5	202,5
L12	50	51	L2	6	41	W2	132,5	133,5	W3	263,5	264,5	W4	202,5	203,5
L12	51,5	52,5	L2	8	43	W2	133,5	134,5	W3	266	267	W4	203,5	204,5
L12	52,5	53,5	L2	10	46	W2	134,5	135,5	W3	267,5	268,5	W4	204,5	205,5
L12	55,5	56,5	L2	13	48	W2	135,5	136,5	W3	269	270	W4	205,5	206,5
L12	58,5	59,5	L2	15	50	W2	136,5	137,5	W3	270,5	271,5	W4	207,5	208,5
L12	60,5	61,5	L2	17	52	W2	137,5	138,5	W3	273,5	274,5	W4	209,5	210,5
L12	63	64	L2	19	54	W2	140,5	141,5	W3	276,5	277,5	W4	211,5	212,5
L12	64	65	L2	21	57	W2	141,5	142,5	W3	277,5	278,5	W4	212,5	213,5
L12	66	67	L2	24	59	W2	142,5	143,5	W3	283,5	284,5	W4	213,5	214,5
L12	67,5	68,5	L2	26	61	W2	143,5	144,5	W4	111,5	112,5	W4	215,5	216,5
L12	69,5	70,5	L2	28	63	W2	145,5	146,5	W4	113,5	114,5	W4	217,5	218,5
L12	71,5	72,5	L2	30	65	W2	146,5	147,5	W4	114,5	115,5	W4	218,5	219,5
L12	73	74	L2	32	67	W2	147,5	148,5	W4	115,5	116,5	W4	219,5	220,5
L12	74,5	75,5	L2	34	69	W3	132,5	133,5	W4	117,5	118,5	W4	221,5	222,5
L12	76,5	77,5	L2	36	71	W3	136,5	137,5	W4	118,5	119,5	W4	222,5	223,5
L13	69,5	70,5	L2	38	72	W3	140,5	141,5	W4	119,5	120,5	W4	223,5	224,5
L13	71,5	72,5	L2	39	74	W3	142,5	143,5	W4	121,5	122,5			
L13	72,5	73,5	L2	41	76	W3	144,5	145,5	W4	123,5	124,5			
L13	74,5	75,5	L2	43	78	W3	146,5	147,5	W4	125,5	126,5			
L13	75,5	76,5	L2	89	125	W3	148,5	149,5	W4	126,5	127,5			
L13	77	78	L2	114	149	W3	150,5	151,5	W4	127,5	128,5			
L13	78	79,5	L2	215	251	W3	154,5	155,5	W4	129,5	130,5			
L13	80	81	L2	240	276	W3	157,5	158,5	W4	131,5	132,5			
L13	82	83	L2	283	319	W3	159,5	160,5	W4	133,5	134,5			
L13	83	84	L2	317	353	W3	161,5	162,5	W4	135,5	136,5			
L13	84	85	L2	341	377	W3	163,5	164,5	W4	136,5	137,5			
L13	85,5	86,5	L2	399	432	W3	166,5	167,5	W4	137,5	138,5			
L13	86,5	87,5	W2	87,5	88,5	W3	169,5	170,5	W4	139,5	140,5			
L13	89	91,5	W2	88,5	89,5	W3	171,5	172,5	W4	140,5	141,5			
L13	92	93	W2	89,5	90,5	W3	172,5	173,5	W4	141,5	142,5			
L13	93,5	94,5	W2	90,5	91,5	W3	174,5	175,5	W4	143,5	144,5			
L13	95,5	96,5	W2	91,5	92,5	W3	176,5	177,5	W4	145,5	146,5			
L14	50	51	W2	92,5	93,5	W3	178,5	179,5	W4	147,5	148,5			
L14	51	52	W2	95,5	96,5	W3	180,5	181,5	W4	149,5	150,5			
L14	53	54	W2	96,5	97,5	W3	183,5	184,5	W4	151,5	152,5			
L14	54	55	W2	97,5	98,5	W3	185,5	186,5	W4	152,5	153,5			
L14	58	59	W2	98,5	99,5	W3	186,5	187,5	W4	153,5	154,5			
L14	61	62	W2	99,5	100,5	W3	189,5	190,5	W4	155,5	156,5			
L14	62	63	W2	100,5	101,5	W3	191,5	192,5	W4	157,5	158,5			
L14	63	64	W2	101,5	102,5	W3	193,5	194,5	W4	158,5	159,5			
L14	65	66	W2	102,5	103,5	W3	195	196	W4	159,5	160,5			
L14	68	69	W2	103,5	104,5	W3	196,5	197,5	W4	161,5	162,5			
L14	70	71	W2	104,5	105,5	W3	199,5	200,5	W4	163,5	164,5			
L14	71	72	W2	105,5	106,5	W3	202,5	203,5	W4	164,5	165,5			
L14	72	73	W2	106,5	107,5	W3	203,5	204,5	W4	165,5	166,5			
L14	74	75	W2	107,5	108,5	W3	206,5	207,5	W4	166,5	167,5			
L14	80	81	W2	108,5	109,5	W3	209,5	210,5	W4	167,5	168,5			
L14	83	84	W2	109,5	110,5	W3	212,5	213,5	W4	168,5	169,5			
			W2	110,5	111,5	W3	215,5	216,5	W4	169,5	170,5			
			W2	111,5	112,5	W3	217,5	218,5	W4	171,5	172,5			
			W2	112,5	113,5	W3	219,5	220,5	W4	173,5	174,5			
			W2	113,5	114,5	W3	222,5	223,5						

6.2.3 Altersmodelle

NBS L2		NBS W4		Gn4		Gn5		Gn6		Gn7	
Tiefe [cm]	Alter [a BP cal]	Tiefe [cm]	Alter [a BP cal]	Tiefe [cm]	Alter [a BP cal]	Tiefe [cm]	Alter [a BP cal]	Tiefe [cm]	Alter [a BP cal]	Tiefe [cm]	Alter [a BP cal]
5	2132	110	2533	.	.	490	1300	355	1000	425	1400
:	:	:	:	:	:	491	1303	356	1006	426	1404
-1	-20	-1	-7,25	-1	-2,53	+1	+3,33	+1	+5,71	+1	+4,39
10	2230	241	3483	484	1307	:	:	:	:	:	:
11	2250	242	3490	485	1310	639	1797	494	1794	579	2076
12	2270	243	3497	486	1313	640	1800	495	1800	580	2080
+1	+19,64	+1	+7,25	+1	+2,53					:	
:	:	:	:	:	:					.	.
.	.	263	3642	634	1687						
39	2800	264	3650	635	1690						
40											
41	2820-2746										
42	lt. archäol. Daten										
43											
44											
45	Hiatus										
46	3180										
47											

Die Altersmodelle werden linear berechnet. Ausgangsdaten (fett gedruckt) sind bei NBS L2 und W4 ¹⁴C-Datierungen und archäologisch belegte Daten; für die Kerne aus dem Gnadensee (Gn4-7) wurden aus der Pollenanalyse abgeleitete Daten verwendet.

6.2.4 Haupt- und Spurenelemente

Kern	Probe	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃ t	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cr	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	Co	V
		[%]										[mg/kg]														
L2	8	1,28	48,1	0,18	0,39	0,71	0,03	0,01	0,03	0,025		<5	8	6	31	<5	4	415	<3	<5	<3		<5	<5	<5	5
L2	8	1,28	48,1	0,18	0,39	0,71	0,03	0,01	0,03	0,025		<5	8	7	31	<5	3	417	<3	<5	<3		<5	<5	<5	5
L2	10	0,56	51,3	0,11	0,20	0,62	0,03	0,00	0,02	0,018		<5	6	5	7	<5	2	447	9	<5	<3		<5	<5	<5	<5
L2	13	0,95	50,1	0,17	0,33	0,63	0,04	0,01	0,02	0,017		<5	5	5	8	<5	3	387	<3	5	<3		<5	<5	<5	<5
L2	15	1,19	49,8	0,19	0,38	0,62	0,04	0,01	0,03	0,018		<5	5	5	8	<5	4	385	<3	<5	<3		5	<5	<5	<5
L2	17	0,80	49,7	0,16	0,27	0,58	0,04	0,01	0,03	0,015		<5	6	5	7	<5	2	393	3	<5	<3		<5	<5	<5	5
L2	19	0,63	50,1	0,16	0,23	0,57	0,03	0,01	0,02	0,013		<5	5	6	8	<5	2	378	<3	<5	<3		<5	<5	<5	<5
L2	21	0,79	49,9	0,18	0,27	0,55	0,03	0,01	0,02	0,017		<5	6	7	13	<5	3	355	3	<5	<3		<5	<5	<5	<5
L2	24	1,74	46,7	0,33	0,51	0,56	0,03	0,03	0,05	0,021		<5	10	7	17	<5	5	337	3	7	<3		5	<5	<5	7
L2	26	2,14	45,3	0,33	0,62	0,59	0,03	0,03	0,07	0,025		5	9	7	15	<5	6	333	6	9	<3		<5	<5	<5	8
L2	28	2,03	44,6	0,24	0,55	0,55	0,04	0,03	0,05	0,016		7	9	6	12	<5	5	336	5	8	<3		<5	<5	<5	9
L2	30	2,34	45,1	0,29	0,64	0,46	0,04	0,04	0,06	0,021		<5	9	6	14	<5	6	339	<3	9	<3		<5	<5	<5	7
L2	32	2,48	44,9	0,28	0,67	0,63	0,03	0,03	0,07	0,021		7	10	6	14	<5	6	336	<3	8	<3		<5	<5	<5	7
L2	34	2,05	49,3	0,31	0,55	0,61	0,04	0,04	0,05	0,016																
L2	36	2,06	47,7	0,27	0,55	0,69	0,04	0,02	0,04	0,017		6	10	5	13	<5	5	408	<3	9	<3	22	<5	<5	<5	6
L2	38	2,05	47,5	0,28	0,56	0,70	0,03	0,03	0,06	0,017		6	7	6	11	<5	6	418	6	6	<3		<5	<5	<5	5
L2	39	1,77	46,6	0,24	0,52	0,69	0,03	0,02	0,03	0,017		<5	9	6	14	<5	5	439	7	8	<3		<5	<5	<5	<5
L2	41	1,25	49,3	0,15	0,37	0,74	0,02	0,03	0,03	0,013		<5	8	6	10	<5	4	509	3	<5	<3		5	<5	<5	<5
L2	43	1,90	47,5	0,31	0,52	0,70	0,02	0,03	0,05	0,020																
L2	45	1,70	45,9	0,26	0,39	0,65	0,01	0,03	0,03	0,014																
L2	92	2,41	47,8	0,67	0,68	0,98	0,03	0,03	0,05	0,015																
L2	218	3,75	49,3	0,40	1,03	1,13	0,05	0,05	0,13	0,009		10	8	5	12	5	10	464	5	17	3	81	<5	<5	<5	10
L2	243	0,64	50,0	0,36	0,55	1,14	0,03	0,02	0,02	0,011		<5	5	<5	9	<5	2	585	<3	8	4	107	<5	<5	<5	<5
L2	286	0,31	51,8	0,29	0,13	1,27	0,04	0,01	0,02	0,005		<5	6	<5	8	<5	n.n.	836	6	<5	4	109	<5	<5	<5	<5
L2	320	20,00	38,6	4,28	5,01	2,82	0,06	0,25	0,83	0,038		56	29	17	42	9	44	745	21	93	9	144	11	<5	6	37
L2	344	39,18	21,1	3,52	10,13	4,55	0,05	0,42	1,73	0,081																
L2	399	36,32	23,6	3,20	9,92	4,30	0,07	0,39	1,70	0,078		104	50	28	71	14	96	372	22	125	12	211	18	9	7	89

6.2.5 Glühverlust (LOI), Karbonatgehalt, Gesamtkohlenstoff und Schwefel

Kern	UK_Probe [cm]	LOI [%]	CaCO3 [%]	C [%]	S [%]	C <20 µm [%]	S <20 µm [%]
L16	43	78	0				
L16	48,5	44	42				
L16	49,5	22	72				
L16	50,5	13	86				
L16	52	12	88				
L16	55	11	89				
L16	56,5	15	81				
L16	57,5	17	77				
L16	58,5	26					
L16	60	24	73				
L16	61	7	95				
L16	62	11	89				
L16	65	14	82				
L16	67,5	14	83				
L16	69,5	16	82				
L16	70,5	61	23				
L16	74		3				
L2	6					13,8	0,070
L2	8	9	86			12,7	0,050
L2	10	5	93	17,8		16,0	0,050
L2	13	4	90			13,4	0,040
L2	15	6	90			13,6	0,050
L2	17	6	91	13,6		12,8	0,020
L2	19	6	91			13,8	0,060
L2	21	7	88			19,9	0,040
L2	24	14	78			19,9	0,150
L2	26	18	75			15,5	0,130
L2	28	16	76			16,5	
L2	30	19	74			16,8	0,140
L2	32	22	69			15,2	0,090
L2	34	16	75			15,1	0,090
L2	36	16	76	13,8		15,7	0,100
L2	38	14	78			15,6	0,130
L2	39	12	79			14,4	0,100
L2	41	10	85	21,1		17,0	0,160
L2	43	23	67	27,1		15,7	0,880
L2	45	40	46	19,5		15,2	0,660
L2	92	21	67	28,7			
L2	116	56	4	12,9		11,5	
L2	218	6	80	12,3		12,9	
L2	243	4	91	12,6		12,4	0,370
L2	286	5	92	6,9		7,9	2,510
L2	320	4	52			4,3	0,260
L2	344	4	35	4,8		4,5	0,040
L2	399	3	38	17,7	0,116		

Kern	Probe	LOI [%]	CaCO3 [%]	C [%]	S [%]	Kern	Probe	LOI [%]	CaCO3 [%]	C [%]	S [%]
L10	41,5	18	76	16,6	0,131	W2	114,5		79		
L10	43	15	79	15,3	0,120	W2	115,5		81		
L10	44,5	11	85	15,8	0,118	W2	116,5		80		
L10	45,5	12	84	15,4	0,095	W2	117,5		79		
L10	47	11	85	15,2	0,133	W2	118,5		83		
L10	47,5	12				W2	119,5		85		
L10	48,5	11	83	15,9	0,151	W2	120,5		86		
L10	49,5	11				W2	121,5		84		
L10	51	11	84	14,1	0,094	W2	122,5		83		
L10	51,5	12				W2	123,5		82		
L10	53	6	92	14,0	0,088	W2	125,5		79		
L10	54	6	93	13,6	0,077	W2	126,5		80		
L10	55	5	97	13,9	0,104	W2	127,5		79		
L10	56,5	6	94	18,4	0,226	W2	128,5		80		
L10	57,5	9				W2	129,5		79		
L10	58,5	19	76	22,9	0,389	W2	130,5		70		
L10	60,5	28	63	18,8	0,536	W2	131,5		65		
L10	61,5	25				W2	132,5		62		
L10	63,5	33	55			W2	133,5		62		
L10	65	18		15,8	0,323	W2	134,5		70		
L10	66,5	25	67			W2	135,5		76		
L10	67,75	18	77			W2	136,5		70		
L10	68,5	13	89	13,9	0,220	W2	137,5		74		
L10	70	6	95	13,4	0,228	W2	138,5		63		
L10	71,5		95	13,0	0,211	W2	141,5		25		
L10	72,5	4	96	13,5	0,248	W2	142,5		30		
L10	73,5	4	94	13,8	0,252	W2	143,5		38		
L10	74,5	5	95	13,9	0,275	W2	144,5		48		
L10	75,5	5	89	15,3	0,388	W2	146,5		49		
L10	76,5	10	85			W2	147,5		51		
L10	77,5	22				W2	148,5		52		
L10	80,5	77				W3	133,5		25	24,4	0,288
L10	84,5	76				W3	141,5		46	20,8	0,210
W2	88,5		68			W3	145,5		78	14,4	0,168
W2	89,5		63			W3	151,5		80	13,2	0,179
W2	90,5		63			W3	155,5		80	16,1	0,187
W2	91,5		55			W3	158,5			15,5	0,183
W2	92,5		56			W3	160,5		78	15,0	0,193
W2	93,5		58			W3	167,5		62	18,8	0,161
W2	96,5		55			W3	172,5		66	18,1	0,201
W2	97,5		55			W3	175,5		71	15,5	0,185
W2	98,5		67			W3	179,5		70	17,0	0,211
W2	99,5		72			W3	186,5		75	16,2	0,216
W2	100,5		85			W3	192,5		68	18,6	0,197
W2	101,5		84			W3	194,5		72	17,2	0,191
W2	102,5		80			W3	200,5		76	15,5	0,180
W2	103,5		77			W3	203,5		83	14,4	0,156
W2	104,5		78			W3	207,5		78	16,0	0,185
W2	105,5		71			W3	216,5		70	17,4	0,222
W2	106,5		72			W3	218,5		70	18,4	0,222
W2	107,5		63			W3	220,5		73	17,7	0,202
W2	108,5		66			W3	230,5		78	15,2	0,194
W2	109,5		64			W3	232,5		83	14,5	0,204
W2	110,5		65			W3	234,5		78	15,6	0,150
W2	111,5		70			W3	240,5		78	15,7	0,165
W2	112,5		74			W3	246,5		67	18,5	0,240
W2	113,5		75			W3	254		67	19,1	0,171

Kern	Probe	LOI [%]	CaCO3 [%]	C [%]	S [%]	Kern	Probe	LOI [%]	CaCO3 [%]	C [%]	S [%]
Gn4	485		83	11,6	0,254	Gn6	354,5		83	11,1	0,189
Gn4	486,5		78	11,2	0,320	Gn6	357		88	11,8	0,219
Gn4	490		80	11,5	0,278	Gn6	359		86	11,3	0,196
Gn4	494,5		82	11,5	0,322	Gn6	362		82	11,9	0,319
Gn4	499,5		79	11,5	0,316	Gn6	363,5		87	12,0	0,240
Gn4	500		86	11,9	0,229	Gn6	368		80	12,0	0,379
Gn4	504		84	11,9	0,266	Gn6	376		92	11,8	0,159
Gn4	507,5		94	11,9	0,146	Gn6	384,5		74	11,7	0,329
Gn4	511,5		93	12,0	0,163	Gn6	395		75	11,9	0,384
Gn4	513		83	11,8	0,279	Gn6	398,5		82	12,9	0,344
Gn4	517		89	12,0	0,224	Gn6	406,5		80	12,0	0,338
Gn4	519,5		85	12,0	0,288	Gn6	409		81	11,5	0,287
Gn4	525		83	11,7	0,284	Gn6	415		80	11,7	0,311
Gn4	527,5		86	12,0	0,277	Gn6	421		83	11,9	0,333
Gn4	549		88	11,9	0,244	Gn6	423		85	12,0	0,282
Gn4	555,5		89	11,9	0,202	Gn6	433		85	12,0	0,263
Gn4	558,5		91	12,1	0,187	Gn6	435		87	12,2	0,239
Gn4	560		91	11,9	0,209	Gn6	442,5		80	11,5	0,319
Gn4	561,5		88	11,9	0,237	Gn6	444		81	11,4	0,292
Gn4	568		89	12,1	0,231	Gn6	460,5		82	11,8	0,299
Gn4	569		90	12,1	0,198	Gn6	464,5		79	11,2	0,307
Gn4	571		90	12,1	0,205	Gn6	487		80	11,1	0,320
Gn4	577,5		87	11,5	0,226	Gn6	489,5		81	11,6	0,329
Gn4	580		82	11,1	0,243	Gn6	492		83	11,7	0,299
Gn4	592,5		88	11,6	0,240	Gn7	424,5		82	11,1	0,266
Gn4	594,5		87	11,7	0,261	Gn7	428		83	10,8	0,218
Gn4	602		87	11,8	0,264	Gn7	430,5		79	10,6	0,262
Gn4	603,5		89	11,6	0,235	Gn7	436,5		79	10,4	0,273
Gn4	624		90	11,8	0,223	Gn7	440,5		82	10,2	0,215
Gn4	626		89	11,9	0,212	Gn7	442,5		84	10,7	0,203
Gn4	633		87	11,4	0,210	Gn7	449		82	10,8	0,283
Gn4	635,5		88	11,6	0,228	Gn7	451		86	10,7	0,218
Gn5	640,5		83	12,1	0,357	Gn7	453		86	11,1	0,258
Gn5	633,5		77	12,7	0,445	Gn7	455		85	11,1	0,281
Gn5	629,5		81	11,5	0,344	Gn7	459		84	11,1	0,239
Gn5	620,5		83	12,4	0,322	Gn7	465		78	10,6	0,297
Gn5	604		76	12,0	0,363	Gn7	469		80	10,9	0,288
Gn5	598,5		80	12,2	0,336	Gn7	471		80	10,3	0,250
Gn5	596,5		92	11,6	0,177	Gn7	477		85	11,4	0,247
Gn5	585,5		94	11,7	0,152	Gn7	479		84	11,2	0,276
Gn5	582		88	12,6	0,273	Gn7	487,5		84	10,7	0,258
Gn5	578		86	12,2	0,290	Gn7	490		86	11,2	0,266
Gn5	576,5		94	11,9	0,168	Gn7	495		87	11,7	0,254
Gn5	566		92	11,8	0,184	Gn7	503		83	11,1	0,275
Gn5	564		85	12,2	0,270	Gn7	507		85	11,1	0,227
Gn5	560,5		94	12,1	0,147	Gn7	515		85	10,6	0,246
Gn5	556,5		84	12,8	0,365	Gn7	519		85	11,1	0,262
Gn5	551,5		84	12,9	0,337	Gn7	525		86	11,4	0,279
Gn5	548		79	12,4	0,371	Gn7	529		85	11,4	0,266
Gn5	546,5		85	12,7	0,293	Gn7	533		87	11,7	0,247
Gn5	544		92	12,0	0,155	Gn7	537		85	11,3	0,255
Gn5	534		92	12,0	0,184	Gn7	543		86	11,3	0,257
Gn5	530,5		83	12,3	0,285	Gn7	547		84	11,1	0,285
Gn5	519,5		80	13,0	0,334	Gn7	550		86	10,9	0,238
Gn5	517,5		89	11,8	0,200	Gn7	555		85	11,1	0,250
Gn5	501,5		92	12,1	0,185	Gn7	565		86	11,3	0,269
Gn5	497,5		75	11,5	0,343	Gn7	569		86	11,2	0,283
Gn5	494,5		86	11,4	0,211	Gn7	571		85	11,2	0,267
Gn5	489		81	11,9	0,286	Gn7	575		88	11,5	0,235
						Gn7	579		90	11,8	0,232

Lebenslauf

Name: Frank Ellminger
geboren am: 25.01.1968 in Ludwigshafen/Rhein
Nationalität: deutsch
Familienstand: ledig

08/'74 - 07/'78 Friedrich-Ebert-Grundschule, Frankenthal
08/'78 - 07/'87 Karolinen-Gymnasium, Frankenthal (Abschluss: Abitur)
09/'87 - 04/'89 Zivildienst
05/'89 - 09/'90 Aushilfstätigkeiten und 7-monatige Südamerikareise
10/'90 - 05/'96 Studium der Mineralogie an der Universität Heidelberg (Vordiplom 02/'93, Diplom 05/'96, Diplomarbeit über „Auensedimente als geochemisch-mineralogisches Archiv früher Bergbautätigkeiten“)
06/'96 - 09/'00 wissenschaftlicher Angestellter beim Landesdenkmalamt Baden-Württemberg und Beginn der Dissertation
seit 09/'00 Fertigstellung der Dissertation

Weikersheim-Laudenbach, den 17.11.2001

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel durchgeführt habe.