Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Die Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals lakustriner Sedimente als mögliches Paläothermometer

Robert Moschen



Umwelt
Environment

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment Band / Volume 51

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre
Institut V: Sedimentäre Systeme (ICG-V)

Die Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals lakustriner Sedimente als mögliches Paläothermometer

Eine Kalibrierungsstudie im Holzmaar (Westeifel-Vulkanfeld)

Robert Moschen

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment Band / Volume 51

ISSN 1433-5530 ISBN 3-89336-371-8

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Herausgeber und Vertrieb:	Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek D-52425 Jülich Telefon: 02461 61-5368 · Telefax: 02461 61-6103 e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de Internet: http://www.fz-juelich.de/zb
Umschlaggestaltung:	Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH
Druck:	Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH
Copyright:	Forschungszentrum Jülich 2004

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment Band / Volume 51

D 38 (Diss., Köln, Univ., 2004)

ISSN 1433-5530
ISBN 3-89336-371-8

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Oxygen isotopes from biogenic silica of lake sediments as a possible palaeothermometer

A calibration study at Lake Holzmaar (Eifel volcanic field, Germany)

ABSTRACT

Biogenic silica from diatom frustules could be an important tool in reconstructing the climate and ecology of the past, because its oxygen isotope composition is potentially useful as a lacustrine palaeothermometer, particularly in those cases where the commonly used calcareous microfossils are rare or absent. Diatom frustules are said to be very stable over long time periods and thus the stable oxygen isotopes within the frustule´s SiO_2 should allow the development of a paleothermometer. Up to now data from calibration studies are rare, and there are only rough estimates regarding the relationship between the oxygen isotope composition of the biogenic silica from diatom frustules and the temperature of the water at growth.

The aim of this study was to provide evidence that the oxygen isotope composition of diatomaceous silica varies regularly with temperature during diatom growth. A further objective was to investigate if a species-dependent fractionation effect exists during the SiO_2 uptake and skeletal formation by the diatoms.

In a case study of four years meteorological, hydrological and isotope-geochemical data of high time resolution were recorded. The results show that the most important zone which depicts the temperature information by the oxygen isotope signal is the epilimnion of the lake. Its spatial and temporal variations of water temperature and $\delta^{18}O_{H2O}$-values are the essential factors for the oxygen isotope signature of diatom silica. During the investigations a large number of samples of settling matter were collected in sediment traps at a depth of seven meters just below the euphotic zone of the lake. For the deduction of the temperature-dependent oxygen isotope fractionation, preserved in biogenic silica of recent freshwater diatoms, lake water temperature and the $\delta^{18}O_{H2O}$-values of the water were determined accordingly. The diatom frustules were separated from the bulk sediment by SPLITT-fractionation and the oxygen bound in the silica extracted quantitatively applying a completely new method (developed in the Institute of Chemistry and Dynamics of the Geosphere V: Sedimentary Systems at the Research Centre Juelich) which is based on the disintegration of the siliceous material and its reduction by carbon under high vacuum at temperatures of about 1,530 °C. At this temperature the biogenic silica will easily be decomposed, whereby the liberated oxygen is converted to carbon monoxide (CO). The CO, whose oxygen isotope composition remains equivalent to that of the biogenic silica, will afterwards be measured in an isotope ratio mass spectrometer.

Based on the obtained data, a strong linear correlation between fractionation ($\varepsilon_{silica\text{-}water}$) and the respective water temperature was found within the seasonal cycle. This leads to an overall temperature coefficient of ≈ -0.2 ‰ per °C for water temperatures between 3 and 22 °C. The functional relationship between the water temperature which prevailed during valve formation and the fractionation results in $T(°C) = 190.07 - 5.26\ (\delta^{18}O_{Opal} - \delta^{18}O_{Water})$.

In order to investigate a possible species-dependent fractionation effect, all samples were separated into three size classes, i.e. 20-80 µm, 10-20 µm and 5-10 µm respectively, before oxygen isotope measurements. However, separation did not lead to monospecies samples but the different size classes merely represent an enrichment of different sized genera in respective classes. Calculating the fractionation for the three size classes separately resulted in τ-values of -0.21 ‰, -0.19 ‰ and -0.19 ‰ per °C respectively. This negligibly differences between the τ-values are within the methodologycal uncertainties. Thus, no species-specific differences occur during oxygen isotope fractionation of freshwater diatoms in Lake Holzmaar under recent ecological conditions.

This indicates that the fractionation between biogenic silica produced by freshwater diatoms and water is a purely physical process independent of diatom species. Therefore the relationship between the oxygen isotope fractionation and the lake water temperature offers the possibility to use the oxygen isotopes from biogenic silica deposited in lake sediments as a temperature-proxy in order to reconstruct changes in water temperature of the past.

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract V

Abbildungsverzeichnis XI

Tabellenverzeichnis XV

A Grundlagen

1 Einleitung 1

1.1 Problemstellung 3
1.2 Zielsetzung der Arbeit 5

2 Theoretische Grundlagen 6

2.1 Stabile Isotope von Sauerstoff und Kohlenstoff 6
2.2 Stabile Sauerstoffisotope in der Hydrosphäre 7
2.3 Stabile Sauerstoffisotope in biogenem Opal 9
2.4 Die Biologie der Diatomeen 13
2.5 Der See als Transfersystem für Klimainformationen 15

3 Der Untersuchungsraum 17

3.1 Naturräumliche Lage 17
3.2 Geologie 18
3.2.1 Zur Entstehung von Maaren 19
3.3 Klima 20
3.4 Böden, Vegetation und Bevölkerung 20
3.5 Holzmaar und Meerfelder Maar 22

4 Feld- und Labormethoden 25

4.1 Probenahme (Feldarbeit) 25
4.1.1 Hydrologisch-limnologische in situ-Untersuchungen 25
4.1.2 Gewinnung von Wasserproben 26
4.1.3 Gewinnung von rezenten Sedimentproben 27
4.2 Meteorologische Daten 28
4.3 Separation von Diatomeenvalven aus rezenten Sedimenten mittels SPLITT-Fraktionierung 29
4.4 Isotopenanalytik 32
4.4.1 Bestimmung der Sauerstoffisotopenverhältnisse von biogenem Opal 32
4.4.2 Bestimmung der Sauerstoffisotopenverhältnisse von Wässern 33

B Methodenentwicklung

5 Die Hochtemperaturzelle HTZ - Methodenentwicklung zur quantitativen Extraktion von Sauerstoff aus biogenem Opal 34

5.1 Aufbau der HTZ 35
5.2 Ablauf eines Probenaufschlusses in der HTZ 36
5.3 Generatorleistung und Aufschlusstemperatur 38
5.4 Ermittlung der Aufschlusstemperatur für biogenen Opal 39
5.5 Quantitative Überführung des Sauerstoffs biogenen Opals in Kohlenstoffmonoxid 40
5.6 Probenvorbehandlung vor dem Aufschluss des biogenen Opals 41
5.7 Reproduzierbarkeit der mit der HTZ produzierten Messgasproben 44
5.8 Eichung eines Laborstandards gegen den internationalen Standard NBS28 45
5.9 Abgleich mit Ergebnissen der Fluorinierungsmethode 46

C Ergebnisse

6 Meteorologische Beobachtungen an der Klimastation Holzmaar 48

6.1 Globalstrahlung 48
6.2 Lufttemperatur 49
6.3 Niederschlag 50
6.4 Windgeschwindigkeit 51

7 Limnologisch-hydrochemische Untersuchungen im Wasserkörper des Holzmaares 52

7.1 Wassertemperatur 53
7.2 Sichttiefe nach SECCHI 55
7.3 Photosynthetisch aktiver Wellenlängenbereich des Lichtes (PAR) 56
7.4 pH-Wert 57
7.5 Gelöster Sauerstoff 59
7.6 Hydrochemische Charakterisierung des Holzmaares 61
7.6.1 Gelöstes Nitrat 62
7.6.2 Gelöstes Silizium (Kieselsäure) 64

8 Sedimentationsraten im Pelagial des Holzmaares 66

8.1 Separierte Diatomeen aus Sedimentfängen der Jahre 2000, 2001 und 2002 69

9 Stabile Isotope des Sauerstoffs 75

9.1 Niederschlag 75
9.2 Zuflüsse 76
9.3 Wasserkörper des Holzmaares 76
9.4 Wasserkörper des Meerfelder Maares und Meerbach 77
9.5 Rezente Diatomeen des Holzmaares aus Sedimentfängen 2000, 2001 und 2002 78

D Diskussion

10 Die regionalen Witterungsverhältnisse in der Westeifel 81

11 Übertragung von atmosphärischen Klimasignalen in den Wasserkörper des Holzmaares 83

11.1 Strahlung, Luft- und Wassertemperatur - Übertragung des Temperatursignals 83
11.2 Intraanuelle und interanuelle Sauerstoffisotopenvariationen 86
11.3 Interanuelle Sauerstoffisotopenvariationen in den Wasserkörpern von Holzmaar und Meerfelder Maar 88

12 Die Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals rezenter Diatomeen des Holzmaares 90

12.1 Variationen der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte und Auswirkungen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen 90
12.2 Das temperaturabhängige Sauerstoffisotopensignal im biogenen Opal rezenter Diatomeen 92
12.3 Die Sauerstoffisotopenfraktionierung in Abhängigkeit von der Größenklasse der Diatomeenvalven 100
12.4 Speicherung des Temperatursignals 109

13 Resümee und Ausblick 113

14 Zusammenfassung 117

15 Literaturverzeichnis 119

Danksagung 129

Anhang

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Jahresdurchschnittstemperatur der Klimastationen Berlin-Tempelhof, Amsterdam-De Bilt, Frankfurt a.M., Paris-Le Bourget, Prag-Ruzyne, Wien-Hohe Warte und Strassburg 1

Abb. 2: Modellhafte Darstellung der Sauerstoffisotopenverhältnisse im globalen Wasserdampfkreislauf 8

Abb. 3: Frustulum einer Diatomee der Familie *Navicula* 13

Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des Aufzeichnungs- und Ablagerungsmechanismus von Klimasignalen in einem von Diatomeen besiedelten See und Steuergrößen der Aufzeichnung 16

Abb. 5: Geographische Einordnung und Lage der untersuchten Maarseen im Westeifel-Vulkanfeld 17

Abb. 6: Bathymetrische Karte des Holzmaares 23

Abb. 7: SPLITT-Zelle in schematischem Aufriss 30

Abb. 8: SPLITT-Zelle im Schnitt 31

Abb. 9: Schematische Darstellung der Hochtemperaturzelle (HTZ) 36

Abb. 10: Verlauf der Gasentwicklung in der HTZ beim Aufschluss von biogenem Opal 37

Abb. 11: Kalibrierungskurve zur Bestimmung der Temperatur in der Probenkammer der HTZ mit Hilfe der eingestellten Generatorleistung 38

Abb. 12: Sauerstoffisotopenwerte des Laborstandards (Kieselgur) in Abhängigkeit von der Generatorleistung, i.e. der Aufschlusstemperatur 39

Abb. 13: Kohlenstoffmonoxidausbeuten in der HTZ bei Einwaagen von 500 bis 2.000 µg biogenem Opal 41

Abb. 14: δ^{18}O-Werte von *Fragilaria crotonensis* und dem Laborstandard (Kieselgur) ohne thermische Vorbehandlung sowie nach thermischer Vorbehandlung bei 500, 800, 980 und 1.030 °C vor dem Aufschluss des biogenen Opals 42

Abb. 15: Vergleich der δ^{18}O-Werte von *Ethmodiscus rex* mit Messwerten des Laborstandards (Kieselgur) und des NBS28 Standards (Quarz) nach Aufschlüssen mit der HTZ 46

Abb. 16: Zehntägige gleitende Tagesmittelwerte von Globalstrahlung (kWh/m^2/d) und Lufttemperatur (°C) an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes 48

Abb. 17: Tagesmittelwerte des Niederschlags [mm/d] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes 50

Abb. 18: Mittelwerte der Windgeschwindigkeit [m/s] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes 51

Abb. 19: Wassertemperatur [°C] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares 2001 53

Abb. 20: Wassertemperatur [°C] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 54

Abb. 21: Sichttiefe nach SECCHI und maximale Tiefe der euphotischen Zone im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes, berechnet nach verschiedenen Autoren 56

Abb. 22: Tiefe der Kompensationsebene zwischen euphotischer und aphotischer Zone nach der Messung mit einem Lichtquantensensor im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 57

Abb. 23: pH Wert des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 58

Abb. 24: Sauerstoffkonzentration [mg/l] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 59

Abb. 25: Vertikale Sauerstoff- und Temperaturverteilung im Pelagial des Holzmaares während der thermischen Sommerstagnation im Jahr 2000 60

Abb. 26: Nitratkonzentration [mg/l] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 62

Abb. 27: Nitratkonzentration [mg/l] des Sammetbaches während des Untersuchungszeitraumes 63

Abb. 28: Siliziumkonzentration [mg/l] im Epilimnion und Hypolimnion im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 64

Abb. 29: Siliziumkonzentration [mg/l] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares 2002 65

Abb. 30: Vergleich der Sedimentakkumulation in den Sedimentfallen während des Untersuchungszeitraumes 66

Abb. 31: Mittelwerte der Sedimentationsrate [g/m^2/d] im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 67

Abb. 32: Separierbare Mengen von Diatomeenvalven aus 1.000 mg der rezenten Sedimentproben aus der 7- und 16-Meter-Falle im Pelagial des Holzmaares im Zeitraum 12.09.2000 bis 06.02.2002 72

Abb. 33: Gehalt an gelöstem Silizium im oberen Epilimnion im Pelagial des Holzmaares im Jahr 2001 73

Abb. 34: Sauerstoffisotopenverhältnisse [‰] vs. V-SMOW des Niederschlags und im Sammetbach während des Untersuchungszeitraumes 75

Abb. 35: Variation der Sauerstoffisotopenverhältnisse [‰] vs. V-SMOW des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes 77

Abb. 36: Variation der Sauerstoffisotopenverhältnisse [‰] vs. V-SMOW des Wasserkörpers im Pelagial des Meerfelder Maares während des Untersuchungszeitraumes 2000 bis 2002 78

Abb. 37: Vergleich der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur [°C] an den Stationen Holzmaar und Manderscheid für die Jahre 1999 bis 2001 81

Abb. 38: Vergleich der Tagesmittelwerte der Globalstrahlung [kWh/m^2/d] an den Stationen Holzmaar und Trier-Petrisberg für die Jahre 1999 bis 2001 82

Abb. 39: 14tägiger Mittelwert der Lufttemperatur an der Station Holzmaar [°C] sowie 14tägige Mittelwerte der Wassertemperatur [°C] in 2 und 4 m Tiefe (2001 und 2002) 83

Abb. 40: 14tägiger Mittelwert der Lufttemperatur an der Station Holzmaar [°C] und aus der Wassertemperatur in 0, 2 und 4 m Wassertiefe rekonstruierte Lufttemperatur [°C] während des Untersuchungszeitraumes 85

Abb. 41: Intraannuelle Veränderungen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Wasserkörper des Holzmaares und der Wasserquellen des Sees im Jahr 2000 86

Abb. 42: Saisonale Variationen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte [‰] vs. V-SMOW des oberen Epilimnions des Holzmaares und des Meerfelder Maares während des Untersuchungszeitraumes 88

Abb. 43: Die saisonale Variation der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte [‰] vs. V-SMOW des oberen Epilimnions des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes sowie Mittelwerte 1994 und 1995 aus 2 m Tiefe nach LÜCKE 1998 89

Abb. 44: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares 93

Abb. 45: Diatomeenakkumulationsrate (DAR) im Jahresverlauf 2001 im pelagialen Lebensraum des Holzmaares auf der Basis der Valvenseparation aus Sedimentfallenmaterial aus der 7-Meter-Falle. 94

Abb. 46: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares im Vergleich zu Ergebnissen früherer Studien 97

Abb. 47: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares im Vergleich zu den Ergebnisse der Laborstudie von BRANDRISS et al. (1998) 98

Abb. 48: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares in Abhängigkeit ihrer Größenklasse im Temperaturintervall zwischen 3 und 22 °C 101

Abb. 49: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares und die Wassertemperatur im Lebensraum der Algen im Zeitraum der jeweiligen Valvenakkumulation 102

Abb. 50: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares in Abhängigkeit ihrer Größenklasse im Temperaturintervall zwischen 3 und 14 °C 102

Abb. 51: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares in Abhängigkeit ihrer Größenklasse im Temperaturintervall zwischen 3 und 22 °C 105

Abb. 52: $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals rezenter Diatomeen des Holzmaares aus Sedimentfallenmaterial der Jahre 2001 und 2002 aus zwei unterschiedlichen Gewinnungstiefen sowie die Wassertemperatur im Lebensraum der Algen im jeweiligen Akkumulationszeitraum 110

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Hydrographische und morphometrische Kenndaten von Holzmaar und Meerfelder Maar nach verschiedenen Autoren	24
Tab. 2:	Überblick über die aufgezeichneten Daten und die Probenahme am Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes	25
Tab. 3:	Von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ermittelte Temperaturwerte als Funktion der Spannung am Ausgang des Quotientenpyrometers	38
Tab. 4:	δ^{18}O-Werte von *Cyclotella meneghiniana* nach unterschiedlich langer Verweilzeit in entionisiertem Wasser	43
Tab. 5:	Untersuchungsserien zur Reproduzierbarkeit der Sauerstoffisotopenverhältniswerte des Laborstandards (Kieselgur)	44
Tab. 6:	Kalibrierung des Laborstandards (Kieselgur) gegen NBS28 (Quarz)	45
Tab. 7:	Monatsmittelwerte der Temperatur [°C] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes	49
Tab. 8:	Monatssummen des Niederschlags [mm/m] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes	50
Tab. 9:	Temperatur, Dichte und spezifisches Volumen des Wassers	53
Tab. 10:	Mittlere Konzentrationen der wichtigsten Makronährstoffe im Wasserkörper des Holzmaares	61
Tab. 11:	Mittelwert, Standardabweichung und Stichprobenumfang der Nitratkonzentration der einzelnen Nitratquellen während des Untersuchungszeitraumes	63
Tab. 12:	Mittelwert, Standardabweichung und Stichprobenumfang der Siliziumkonzentration der einzelnen Siliziumquellen während des Untersuchungszeitraumes	65
Tab. 13:	Nach Siebfraktionen getrennte Ausbeuten von Diatomeenvalven aus rezenten Sedimentproben aus dem Holzmaar	69-71
Tab. 14:	Mittelwert, Standardabweichung und Stichprobenumfang der Sauerstoffisotopenverhältniswerte der einzelnen Wasserquellen während des Untersuchungszeitraumes	76
Tab. 15:	Sauerstoffisotopenverhältniswerte des biogenen Opals der Diatomeenvalven aus rezenten Sedimenten des Holzmaares der Jahre 2000 bis 2002	79-80
Tab. 16:	Sauerstoffisotopenverhältniswerte des biogenen Opals der Diatomeenvalven aus einer Kastengreiferprobe	80
Tab. 17:	$\delta^{18}O_{SiO2}$-Mittelwerte der rezenten Diatomeenproben, Mittelwerte der im Bildungszeitraum der Valven herrschenden Wassertemperatur sowie zugehörige $\delta^{18}O_{H2O}$-Mittelwerte	91
Tab. 18:	Vergleichswerte der maximalen Sauerstoffisotopenvariation im biogenen Opal rezenter Diatomeenvalven des Holzmaares der Vegetationsperiode 2001 ohne [a] bzw. mit [b] Berücksichtigung der $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen im Epilimnion	92
Tab. 19:	Die temperaturabhängige Sauerstoffiraktionierung beim Valvenaufbau rezenter Diatomeen des Holzmaares, aufgefangen in der 7-Meter-Falle	94
Tab. 20:	Die temperaturabhängige Sauerstoffiraktionierung beim Valvenaufbau rezenter Diatomeen nach verschiedenen Autoren	96
Tab. 21:	Prozentualer Anteil der vorkommenden Diatomeentaxa in den aus der 7-Meter-Falle gewonnenen Proben des Jahres 2000	108

1 Einleitung

Umwelt- und Klimaänderungen bestimmen wesentlich die Entwicklung und Veränderung von Ökosystemen und damit auch der natürlichen Lebensgrundlage des Menschen. Die immer stärker werdenden anthropogenen Eingriffe in die Ökosysteme der Erde lassen auch einen Einfluss des Menschen auf die zukünftige Klimaentwicklung erwarten. Wirkung und Ausmaß der anthropogenen Aktivitäten sind dabei jedoch keineswegs klar vorhersehbar, denn die Prognose der Klimaentwicklung und die Prognose der menschlichen Einflussnahme auf die Klimaentwicklung werden durch zahlreiche Unsicherheitsfaktoren erschwert.

Im jüngsten Bericht des „Intergovernmental Panel of Climate Change“ wird ein kontinuierlicher Anstieg der globalen Oberflächentemperatur seit dem Jahre 1861 postuliert. Allein im 20. Jahrhundert erhöhte sich diese laut IPCC-Bericht um ca. 0,6 °C. Als Hauptverursacher für diesen sich in den letzten Dekaden immer stärker abzeichnenden Trend werden anthropogene Aktivitäten angesehen (vgl. Abb. 1). So stiegen die atmosphärischen Konzentrationen wichtiger Treibhausgase aufgrund der Verbrennung fossiler Energieträger, des Anwachsens der landwirtschaftlichen Produktion und durch Veränderungen in der Landnutzung im gleichen Zeitraum rasch an. Die atmosphärische Kohlenstoffdioxidkonzentration erhöhte sich seit 1750 von ca. 280 ppm auf einen aktuellen Durchschnittswert von ca. 370 ppm, die Methankonzentration stieg zeitgleich von ca. 700 ppb auf nunmehr ca. 1.800 ppb an (IPCC 2001). Auch die instrumentellen Temperaturaufzeichnungen alter mitteleuropäischer Klimastationen, an denen z.T. bereits zu Beginn des 18. Jahrhunderts mit der Aufzeichnung wichtiger Klimaparameter begonnen wurde, lassen auf einen Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur innerhalb der letzten 200 Jahre schließen, wenngleich diese Zunahme noch nicht als signifikant angesehen werden kann (vgl. Abb. 1).

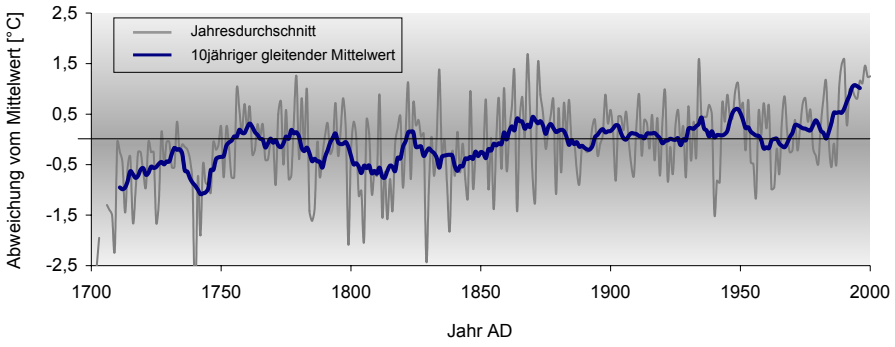


Abb. 1: Jahresdurchschnittstemperatur der Klimastationen Berlin-Tempelhof (1702-1998), Amsterdam-De Bilt (1706-1999), Frankfurt a.M. (1757-1961), Paris-Le Bourget (1757-1998), Prag-Ruzyne (1771-1993), Wien-Hohe Warte (1775-1993) und Strassburg (1801-1999); (Quelle: NCDC, DWD)

1 EINLEITUNG

Seit dem Begin der 1990er Jahre wird aufgrund messbarer Erhöhungen der Lufttemperatur vor allem auf der Nordhalbkugel der Begriff des „Globalen Wandels“ in Wissenschaft und Politik zunehmend diskutiert. Die wichtigsten dabei zu klärenden Fragen lauten: Hat sich das Klima der Erde seit der vorindustriellen Zeit auf regionaler und/oder globaler Ebene verändert? Wenn dies der Fall ist, welcher Teil der beobachteten Veränderungen ist auf menschliche Einflüsse zurückzuführen und welcher auf natürliche Prozesse?
Aus geowissenschaftlicher Sicht ist der Begriff Klimaänderung als langfristiger Wechsel zwischen den mittleren Werten wichtiger Klimaelemente wie Strahlung, Temperatur, Niederschlag und Verdunstung zu verstehen, der in erdgeschichtlichen Zeiträumen abläuft. Demgegenüber werden eher kurzfristige und z.T. periodische Oszillationen als sog. Klimaschwankungen bezeichnet. Dabei handelt es sich beispielsweise um Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte andauernde Abweichungen vom allgemeinen Klimacharakter eines Raumes, zu denen das sog. Mittelalterliche Wärmeoptimum und die sog. Kleine Eiszeit zu zählen sind. Genaue Kenntnisse über das Ausmaß und den Verlauf derartiger natürlicher Klimaschwankungen stellen die Basis für eine Abschätzung von anthropogenen Einflüssen auf das globale Klima und dessen zukünftige Entwicklung dar. Erst wenn es gelingt, die räumlichen Muster natürlicher Klimavariationen sowie die Stärke, Häufigkeit und Geschwindigkeit dieser Veränderungen in der Vergangenheit zu analysieren, kann die Frage nach dem tatsächlichen Anteil des anthropogenen Einflusses auf die klimatische Entwicklung beantwortet werden.

Mit der Klärung der aufgeführten Probleme beschäftigt sich die Paläoklimaforschung, die innerhalb der Geowissenschaften ein wichtiges Teilgebiet darstellt. Da aus dem Quartär und insbesondere dem Holozän mehrere Beispiele für die starke Variabilität des Klimas und teilweise sehr rasche klimatische Veränderungen bekannt sind, steht die genaue klimageschichtliche Untersuchung und zuverlässige Beschreibung dieser Periode heute im Fokus der Paläoklimaforschung. Die Grundlage der Forschungsarbeiten bilden in der Vergangenheit entstandene sog. Klimaarchive, in denen klimageschichtliche Veränderungen gespeichert sind. Die wichtigsten der heute zur Verfügung stehenden Archive sind polare Eisbohrkerne, marine und lakustrine Sedimente sowie Baumjahrring-Chronologien.
Vor allem terrestrische Archive besitzen für die Erforschung des zeitlich-räumlichen Ablaufes von Klimaänderungen eine wichtige Bedeutung, da sie Veränderungen im Lebensraum des Menschen dokumentieren (SWART et al. 1993). Neben den Baumjahresringen stehen vor allem lakustrine Sedimente zur Verfügung, die aufgrund relativ hoher Sedimentationsraten häufig gut auflösbare Zeitreihen liefern. Zudem erlauben sie oft eine exakte, z.T. jahrgenaue Datierung des Probenmaterials über das gesamte Holozän, ohne die eine genaue zeitliche Einordnung von Klimaveränderungen nicht denkbar wäre (KELTS & TALBOT 1990, FRENZEL 1995).

Da die paläoklimatischen Informationen in den Archiven in verschlüsselter Form vorliegen, ist es nur möglich quantitative Stellvertreterdaten, sog. *Proxiedaten*, also Daten mit extrahierbaren Klimainformationen, zu ermitteln. Hierfür stellen die stabilen Isotope des Kohlenstoffs und des Sauerstoffs ein wichtiges Instrument dar (SWART et al. 1993, DANSGAARD et al. 1993, SCHLESER et al. 1999). Als Beispiele seien die besonders gut untersuchten Sauerstoffisotopenverhältnisse grönländischer und antarktischer Eisbohrkerne (z.B. DANSGAARD et al. 1993, JOHNSEN et al. 2001), der Kalkschalen von Foraminiferen aus marinen Sedimenten (z.B. SHACKLETON 1987), der Karbonate lakustriner Sedimente (z.B. HAMMERLUND et al. 1999, LOTTER et al. 1992, MCKENZIE & HOLLANDER 1993, RICKETTS & JOHNSON 1996) sowie Sauerstoff- und Kohlenstoffisotopenverhältnisse des Holzes von Baumjahrring-Chronologien (z.B. EPSTEIN & KRISHAMURTHY 1990, TREYDTE 2003) genannt.
Klimatische Informationen sind in den Paläoklimaarchiven ausschließlich in verschlüsselter Form enthalten. Daher kommt der Entschlüsselung der Paläo-Datensätze eine entscheidende Rolle zu. Die Kalibrierung von bereitgestellten Proxies erfolgt entweder mittels Modellen oder durch Prozessstudien (SMOL et al. 1991). Vor allem das Verständnis über die rezent ablaufenden Prozesse ist für die Interpretation der Paläo-Datensätze von entscheidender Bedeutung. Erst die Aufklärung der Übertragungsmechanismen klimatischer Signale in einem rezenten biologischen System sowie die Erlangung von Kenntnissen über die Aufzeichnung und Speicherung derartiger klimatischer Signale in einem Klimaarchiv ermöglicht eine Interpretation der Paläo-Datensätze.

1.1 Problemstellung

Innerhalb Mitteleuropas stellen die lakustrinen Sedimente des Holzmaares ein besonders gut geeignetes Archiv zur Rekonstruktion der Klimageschichte eines menschlichen Lebensraumes dar. Der Maarsee ist sehr klein und nur wenig von seiner Umgebung beeinflusst, wodurch eine gleichmäßige Sedimentakkumulation gewährleistet ist. Zudem sind die Sedimente des Holzmaares warviert, d.h. jahrgenau geschichtet. Sie erlauben damit eine exakte Datierung des Probenmaterials. Mehrere zur Verfügung stehende bis zu 30 Meter lange Bohrkerne liefern hochaufgelöste Datensätze über die klimageschichtliche Vergangenheit der letzten 22.500 Jahre (NEGENDANK et al. 1990).
Die Verwendung von Sauerstoffisotopen aus den Sedimenten des Holzmaares zur Klimarekonstruktion gestaltet sich als sehr schwierig, da in den Sedimenten aufgrund der im Profundal herrschenden Redoxbedingungen keine karbonatischen Minerale wie z.B. Seekreiden oder kalzitische Makro- oder Mikrofossilien enthalten sind. Das häufig genutzte Karbonat-Isotopenthermometer (SIEGENTHALER et al. 1984) ist daher nicht verfügbar um paläoklimatische Informationen zu generieren. Hingegen treten im Holzmaar Diatomeen

(Kieselalgen) auf. Dabei handelt es sich um 2,5 µm bis 2.000 µm große, einzellige photoautotrophe Algen, die charakteristische opalartige Kieselschalen aus Siliziumdioxid bilden (vgl. Kap. 2.4). Nach dem Absterben der Algen sedimentieren diese Kieselschalen auf den Seegrund und bleiben im Sediment erhalten. Entsprechend den Karbonaten besteht die Möglichkeit aufgrund der Kenntnis der Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals derartiger Algenskelette die Temperatur des Wassers zu rekonstruieren, aus dem die Skelette biomineralisiert wurden. Die Isotopenverteilung des in den Kieselschalen eingelagerten Sauerstoffes bietet sich daher im Holzmaar als Träger von Paläotemperaturinformationen an (LÜCKE et al. 2002).

Die wissenschaftliche Grundlage für die mögliche Eignung der Sauerstoffisotopenverhältnisse von biogenem Opal als Paläothermometer lieferten die Arbeiten von LABEYRIE (1972, 1974), LABEYRIE & JUILLET (1980, 1982) und JUILLET-LECLERC & LABEYRIE (1987). Trotz großer präparativer Schwierigkeiten konnten die genannten Autoren den physikochemischen Zusammenhang zwischen dem Isotopenwert des Opals und der Wassertemperatur im Zeitraum der Biomineralisation des Opals aufzeigen. Die Existenz dieser Beziehung wurde in weiteren Arbeiten bestätigt, jedoch ergaben sich eine Reihe methodischer Probleme. Vor allem die quantitative Extraktion des Sauerstoffs aus dem biogenen Opal sowie die Abtrennung einer Vielzahl sauerstoffhaltiger Moleküle und Molekülgruppen, die an den Opal angelagert sind, konnten bisher nicht befriedigend durchgeführt werden (MATHENEY & KNAUTH 1989, CLAYTON 1992, SCHMIDT et al. 1997, BRANDRISS et al. 1998). Außerdem fehlen längerfristige Eichstudien, welche z. B. saisonale Temperaturveränderungen im Lebensraum von Diatomeen zu den jeweils im biogenen Opal gespeicherten Isotopensignalen in Bezug setzen und das „Schicksal“ des Isotopenwertes bis zur Ablagerung im Sediment verfolgen (DOVE & RIMSTID 1994, MCMANUS et al. 1995).

Daher wurden die Sauerstoffisotopenverhältnisse biogenen Opals bisher nur in geringem Maße als Proxieparameter zur Temperaturrekonstruktion eingesetzt (z.B. LABEYRIE 1974, MIKKELSEN et al. 1978, JUILLET et al. 1983, MARTIN 1985, WANG & YEH 1985, JUILLET-LECLERC & SCHRADER 1987, JUILLET-LECLERC et al. 1991, SHEMESH et al. 1992, SHEMESH et al. 1995, RIETTI-SHATI et al. 1998, RIOUAL et al. 2001). Zusammenfassend sind hierfür zwei wesentliche Gründe zu nennen:

1. Einerseits bestehen Unsicherheiten bezüglich der exakten Temperaturabhängigkeit der Isotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal.
2. Andererseits bereiten die Gewinnung des biogenen Opals aus dem Sediment sowie die quantitative Extraktion des Sauerstoffs aus dem Opal und die anschließende Isotopenanalytik erhebliche präparative Probleme.

1.2 Zielsetzung dieser Arbeit

Die Zielsetzung dieser Arbeit orientiert sich an den dargestellten offenen wissenschaftlichen Fragen. Durch die Etablierung einer neuen Methode zur quantitativen Extraktion des Sauerstoffs aus biogenem Opal sollen die derzeit vorhandenen technisch-präparativen Probleme überwunden werden. Darüber hinaus soll eine mehrjährige detaillierte Freilandstudie am Holzmaar die Kenntnisse zur Übertragung von Klimasignalen in einem lakustrinen biologischen System erweitern. Während dieser Studie wird das Zusammenspiel sämtlicher Faktoren, die das Sauerstoffisotopenverhältnis von Diatomeenvalven beeinflussen, über mehrere Vegetationsperioden hinweg untersucht. Unter Einbeziehung der Sedimentations- und Ablagerungsbedingungen des biogenen Opals soll außerdem geklärt werden, ob das Isotopenverhältnis der im Sediment des Sees erhaltenen Valven das in der Produktionszone des Sees gespeicherte Isotopensignal widerspiegelt.

Zusammenfassend sollen in dieser Arbeit folgende Fragen beantwortet werden:

- Sind die derzeitigen Witterungsverhältnisse am Holzmaar repräsentativ für die Westeifel oder treten mikroklimatische Einflüsse des Wasserkörpers oder/und aufgrund der durch den Kraterwall geschützten Lage des Sees in den Vordergrund?
- Wie wirken sich die Witterungsverhältnisse am Holzmaar auf die Wassertemperatur und das Sauerstoffisotopenverhältnis des Wasserkörpers aus?
- Spiegelt das Sauerstoffisotopenverhältnis des biogenen Opals rezenter Diatomeen die Wassertemperatur im Bildungszeitraum der Diatomeenvalven wider?
- Gibt das Sauerstoffisotopenverhältnis des biogenen Opals die kurzfristigen intraannuellen Variationen der Wassertemperatur und des Wasserhaushaltes im Epilimnion des Sees wider?
- Kommt es im Verlauf der Sedimentation von Diatomeenvalven durch das Hypolimnion des Sees und auf den Gewässergrund zu einer Modifikation des im biogenen Opal primär gespeicherten Isotopensignals?

Die Beantwortung dieser Fragen soll es ermöglichen, eine Transferbeziehung zwischen dem Sauerstoffisotopenverhältnis des biogenen Opals rezenter Diatomeen und der zugehörigen Wassertemperatur abzuleiten. Zudem soll beurteilt werden, ob das Sauerstoffisotopenverhältnis von biogenem Opal lakustriner Sedimente in Zukunft als Paläotemperaturindikator dienen kann.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Stabile Isotope von Sauerstoff und Kohlenstoff

Etwa zwei drittel aller natürlich vorkommenden Elemente besitzen zwei oder mehr stabile Isotope, also Nuklide mit gleicher Anzahl an Protonen bei gleichzeitig unterschiedlicher Anzahl an Neutronen. Diese sog. stabilen Isotope eines Elements haben bei differierenden Massenzahlen die gleiche Ordnungszahl (FALBE & REGLITZ 1993).

In den globalen Kreisläufen von Sauerstoff und Kohlenstoff kommen die jeweils leichteren Isotope sehr viel häufiger als die schwereren vor. Aufgrund ihrer verschiedenen Massen zeigen sie bei allen physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen geringfügige, vor der Entwicklung der Isotopenverhältnismassenspektrometrie in den 1950er Jahren nicht messbare Verschiebungen ihres Mischungsverhältnisses in Edukt und Produkt. Innerhalb der Kompartimente eines Ökosystems entstehen Reservoire, in denen die Isotopenzusammensetzung der Substanzen charakteristisch für ihre Entstehungsgeschichte ist (MOSER & RAUERT 1980).

Stabile Isotope des Sauerstoffs:

Die durchschnittliche Häufigkeit der drei natürlich vorkommenden Isotope des Sauerstoffs beträgt ca. 99,76 % für das ^{16}O-Isotop, ca. 0,04 % für das ^{17}O-Isotop und ca. 0,20 % für das ^{18}O-Isotop (GARLICK 1969). Da Verschiebungen des Mischungsverhältnisses massenabhängige Prozesse sind, wird i.d.R. das Verhältnis der Isotope mit dem größten Massenunterschied bestimmt. Beim Sauerstoff wird das $^{18}O/^{16}O$-Verhältnis ermittelt und gegenüber einem internationalen Standard angegeben. Aufgrund der sehr geringen Veränderungen der Häufigkeitsunterschiede bei Verschiebungen des Mischungsverhältnisses (Isotopieeffekte) erfolgt die Darstellung des $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisses in der sog. δ-Nomenklatur relativ zu einem internationalen Standard nach folgender Notation:

$$\delta^{18}O\,[‰] = \left[\frac{(^{18}O/^{16}O)_{Probe} - (^{18}O/^{16}O)_{Standard}}{(^{18}O/^{16}O)_{Standard}} \right] * 1000$$

Die Abreicherung eines isotopisch schwereren Moleküls (z.B. $H_2{}^{18}O$) gegenüber dem Standard wird bei dem angegebenen δ-Wert durch ein vorangestelltes negatives Vorzeichen symbolisiert. Findet eine Anreicherung des schwereren Moleküls statt, so wird kein Vorzeichen vorangestellt (vgl. Kap. 2.2).

Stabile Isotope des Kohlenstoffs:

Die durchschnittliche Häufigkeit der zwei natürlich vorkommenden stabilen Isotope des Kohlenstoffs beträgt 98,89 % für das ^{12}C-Isotop und 1,11 % für das ^{13}C-Isotop (HOEFS 1997).

Die Darstellung des $^{13}C/^{12}C$-Verhältnisses erfolgt ebenfalls in der δ-Nomenklatur relativ zu einem internationalen Standard nach folgender Notation:

$$\delta^{13}C\,[‰] = \left[\frac{(^{13}C/^{12}C)_{Probe} - (^{13}C/^{12}C)_{Standard}}{(^{13}C/^{12}C)_{Standard}} \right] * 1000$$

Internationale Standards:

Der ursprünglich von CRAIG (1957) eingeführte Standard zur Kalibrierung von Kohlenstoffisotopenverhältnissen ist ein biogenes Kalziumkarbonat der PeeDee-Formation aus North-Carolina/USA (PDB Standard; $CaCO_3$), der auch zur Eichung von Sauerstoffisotopenverhältnissen in karbonatischen Materialien verwendet wird. Die Eichung von Sauerstoff- und Wasserstoffisotopenverhältnissen von Wässern und karbonatfreiem Probenmaterial erfolgt dagegen über einen Ozeanwasser-Standard (SMOW - **S**tandard **M**ean **O**cean **W**ater).

Heute sind bei der IAEA (International Atomic Energy Agency, Wien) gegen die Standards PDB und SMOW geeichte, internationale Standards erhältlich, die ein den „Craig-Standards" entsprechendes Isotopenverhältnis haben. Diese Standards sind per Definition mit 0,0 ‰ festgelegt und werden als V-SMOW (Vienna-SMOW) bzw. V-PDB (Vienna-PDB) bezeichnet. Für einen routinemäßigen Betrieb im Labor werden Laborstandards genutzt, die zuvor gegen einen oder mehrere der internationalen Standards geeicht wurden.
Alle in dieser Arbeit aufgeführten Sauerstoffisotopenverhältnisse beziehen sich auf den international gebräuchlichen Standard V-SMOW.

2.2 Stabile Sauerstoffisotope in der Hydrosphäre

In einem System, das aus Molekülen mit verschiedenen Isotopenzusammensetzungen besteht, bedingen deren unterschiedliche physikalische Eigenschaften unterschiedliche Verteilungen der Isotope inerhalb der Moleküle. Wesentlich sind das spezifische Gewicht, molekulare Diffusion sowie Transporteigenschaften, die durch zwischenmolekulare Kräfte beeinflusst werden, wie z.B. die Viskosität und Dipolrelaxation der Isotope. Diese z.T. quantenmechanischen Effekte und die damit verbundene Änderung der Verteilung der Isotope, die auch als Isotopenfraktionierung bezeichnet werden, verstärken sich mit abnehmender Temperatur (MOSER & RAUERT 1980).
Die wichtigsten Ursachen für die Isotopenfraktionierung im hydrologischen System bilden die verschiedenen Dampfdrucke bzw. Schmelzpunkte der einzelnen Isotope eines Moleküls. So führt der höhere Dampfdruck von isotopisch leichterem Wasser (z.B. $H_2{}^{16}O$) gegenüber dem Dampfdruck von schwererem Wasser (z.B. $H_2{}^{18}O$) zu Isotopenfraktionierungen bei

allen Phasenübergängen (z.B. Verdunstung und Kondensation) sowie bei chemischen Lösungsvorgängen und osmotischen Prozessen. Im globalen Wasserkreislauf führt der niedrigere Dampfdruck des $H_2{}^{18}O$-Moleküls zu einer relativen Abreicherung dieses Moleküls im über den Ozeanen gebildeten Wasserdampf, dessen wasser- und lufttemperaturabhängige Isotopensignatur äquatornah bei ca. -8,0 ‰ gegenüber dem Ozeanwasser mit ca. 0,0 ‰ liegt (vgl. Abb. 2). Fortlaufende Kondensationsprozesse und das Abregnen führen bei der Luftmassenbewegung zu einer weiteren stetigen Abreicherung der in der Dampfphase verbleibenden $H_2{}^{18}O$-Moleküle bei gleichzeitig negativer werdenden $H_2{}^{18}O$-Verhältnissen bzw. sinkenden $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten des Niederschlags. Da die Niederschlagsbildung über den Kontinenten hauptsächlich durch die adiabatische Abkühlung, d.h. ohne Wärmeaustausch der Luftmassen verursacht wird, sind erneute Kondensationsprozesse immer auch mit niedrigeren Lufttemperaturen verbunden, was zudem zu einer indirekten Beziehung zwischen der Lufttemperatur und dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Niederschlags führt (SIEGENTHALER 1979).

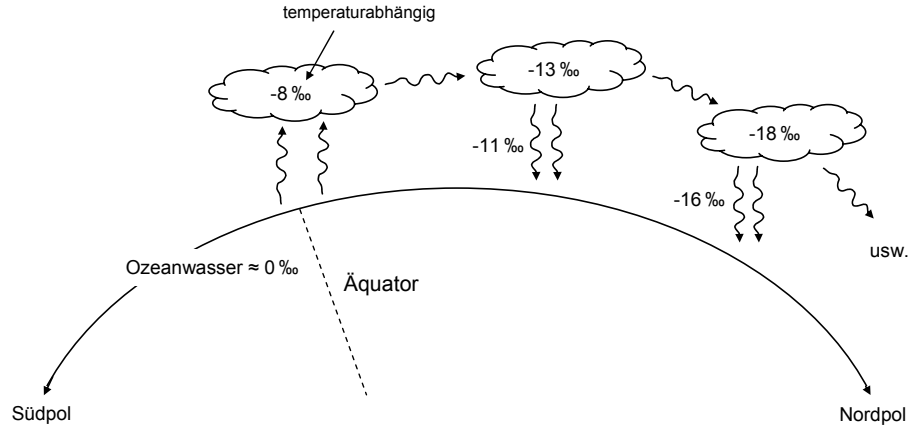


Abb. 2: Modellhafte Darstellung der Sauerstoffisotopenverhältnisse im globalen Wasserdampfkreislauf (verändert nach DANSGAARD 1964)

Aus dieser indirekten Beziehung wurde für nordatlantische und grönländische Küstenstationen ein Temperaturgradient von 0,7 ‰/°C für den breitenabhängigen Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Niederschlags abgeleitet (DANSGAARD 1964, SIEGENTHALER 1979).

Dagegen ermittelten SIEGENTHALER und OESCHGER (1980) für die zentralschweizer Stationen Grimsel (1.950 m ü. NN) und Guttannen (1.055 m ü. NN) saisonale Temperaturgradienten von 0,44 bzw. 0,55 ‰/°C. Diese gegenüber den globalen Beobachtungen niedrigeren Gradienten an den von hohen Bergen umgebenen Klimastationen lassen sich durch einen orographischen Effekt erklären. Der Staueffekt des Gebirges zwingt die feuchten Luftmassen zum Aufsteigen, so dass die Kondensationsebene höher und die Kondensationstemperatur niedriger ist, was zu relativ niedrigen $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten der Niederschläge führt. Der Temperaturgradient für den Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Niederschlags ist somit abhängig von Kontinentalität und Höhenlage (SIEGENTHALER 1979, SIEGENTHALER & OESCHGER 1980, ROZANSKI et al. 1993).

Für den $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert im Wasserkörper von Seen spielt neben dem Isotopenverhältnis des Niederschlags auch das Isotopenverhältnis aller ober- und unterirdischen Zu- und Abflüsse, die Verweilzeit des Wassers im See sowie vor allem die Verdunstung eine wichtige modifizierende Rolle. In großen Seen stellt sich dabei ein Gleichgewicht zwischen dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wasserkörpers und den hydrologischen Randbedingungen entsprechend den regionalen Witterungsverhältnissen ein. Dagegen führt die Evaporation von der Gewässeroberfläche vor allem in kleinen Seen und Reservoiren ohne größere Zu- und Abflüsse durch die Abreicherung der ^{16}O-Isotope im oberen Wasserkörper zu jahreszeitlichen Isotopenvariationen, die zur Erhöhung der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte in den oberflächennahen Schichten des Wasserkörpers führen (VON GRAFENSTEIN et al. 1999).

2.3 Stabile Sauerstoffisotope in biogenem Opal

Eine Vielzahl mariner und lakustriner Organismen wie Diatomeen (Kieselalgen), Rhizopoden (Radiolarien), Chrysophyceen (Goldalgen) und Poriferen (Schwämme) bilden durch die Polymerisation von im Gewässer gelöster Kieselsäure ($H_4SiO_4 \cdot nH_2O$) amorphe, opalartige Gerüstsubstanzen, die nach dem Absterben der Organismen z.T. auf den Gewässergrund sinken und im Sediment erhalten bleiben. Aufgrund des nahezu ubiquitären Vorkommens von Kieselalgen steht der in ihrem biogenen Opal eingelagerte Sauerstoff als Träger von Temperaturinformationen überall dort zur Verfügung, wo das normalerweise genutzte Karbonat-Isotopenpaläothermometer aufgrund fehlender kalzitischer Mikro- und Makrofossilien nicht verfügbar ist (TALBOT 1990, VON GRAFENSTEIN et al. 2000).

Beim Karbonat-Isotopenpaläothermometer dient das Sauerstoffisotopenverhältnis von biogenem kalzitischem Material als Träger der Temperaturinformation. Die Messgaserzeugung erfolgt hier i.d.R. durch einen Phosphorsäureaufschluss des Karbonats zu CO_2 und ist, ähnlich wie die Isotopenanalytik in Wässern, von relativ geringem präparativen Aufwand (VON GRAFENSTEIN et al. 1996, TERANES & MCKENZIE 2001).

Bei der Einlagerung der Kieselsäure in die Zellen der Diatomeen dient der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers, in dem die Organismen ihre Skelette aufbauen, als Quellwert für die Fraktionierung der Sauerstoffisotope was vereinfacht als

$$\delta^{18}O_{H4SiO4} = f\ (T, \delta^{18}O_{H2O}) \longrightarrow \delta^{18}O_{biog.SiO2} = f\ (T, \delta^{18}O_{H4SiO4}, \beta)$$

dargestellt werden kann. In dieser Funktion stellt T [°C] die Wassertemperatur, $\delta^{18}O_{H2O}$ [‰] den Isotopenquellwert und β mögliche biologische Effekte dar, wobei der Isotopenaustausch zwischen Wasser und gelöster Kieselsäure als Gleichgewichtsreaktion stattfindet (1).

$$H_2{}^{18}O + ¼\ H_4Si^{16}O_4 \Longleftrightarrow H_2{}^{16}O + ¼\ H_4Si^{18}O_4 \qquad (1)$$

Auch der Aufbau der opalartigen Gerüstsubstanz der Kieselalgen, i.e. die Isotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal findet als physikalische Gleichgewichtsreaktion statt, für die eine Gleichgewichtskonstante K´ formuliert werden kann. Sie beschreibt ein thermodynamisches Austauschgleichgewicht und entspricht dem Fraktionierungsfaktor α (HOEFS 1997), der sich in vereinfachter Form folgendermaßen darstellt:

$$\alpha = \frac{R_{SiO2}}{R_{H2O}}$$

Daraus resultiert in der δ-Nomenklatur die Beziehung

$$\alpha = \frac{1000 + \delta^{18}O_{SiO2}}{1000 + \delta^{18}O_{H2O}} \quad .$$

Neben dieser rein physikalisch bedingten temperaturabhängigen Isotopenfraktionierung kann es beim Einbau der Kieselsäure in die Gerüstsubstanz der Diatomeen aufgrund metabolischer Prozesse zu biologisch bedingten Abweichungen von der rein physikalischen Gleichgewichtsreaktion kommen. Solche metabolische Prozesse sind bei den photoautotrophen Landpflanzen bekannt und führen dort zu zusätzlichen biochemischen Fraktionierungseffekten (LIPP et al. 1991, SAURER et al. 1997). Die Details der metabolischen Prozesse bei der Polymerisation von in Gewässern gelöster Kieselsäure zur opalartigen Gerüstsubstanz sind für Diatomeen bisher jedoch nur ungenügend untersucht und daher nicht genau verstanden (FLYNN & MARTIN-JÉZÉQUEL 2000, MARTIN-JÉZÉQUEL et al. 2000).

Im Gegensatz zu Karbonaten wurden $\delta^{18}O_{biog.SiO2}$-Werte biogenen Opals, die im Folgenden als $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte bezeichnet werden, bisher nur in geringem Maße als Proxieparameter bzw. zur Temperaturrekonstruktion eingesetzt (LABEYRIE 1974, MIKKELSEN et al. 1978, JUILLET et al. 1983, WANG & YEH 1985, JUILLET-LECLERC et al. 1991, SHEMESH et al. 1992, SHEMESH et al. 1995, RIETTI-SHATI et al. 1998, RIOUAL 2001, HU & SHEMESH 2003).

Die wesentlichen Gründe hierfür liegen in präparativen Schwierigkeiten. So bereitet bereits die Separation des biogenen Opals aus einem Sediment erhebliche Probleme und ist mit einem sehr hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden (RINGS et al. 2004). Auch die quantitative Extraktion des Sauerstoffs aus dem biogenen Opal ist aufgrund von möglichen Isotopenaustauschreaktionen zwischen dem Opal und den an diesen angelagerten sauerstoffhaltigen Fremdbestandteile schwierig (JUILLET-LECLERC et al. 1991, BRANDRISS et al. 1998).

Dennoch lieferten die Arbeiten von LABEYRIE (1972, 1974) und JUILLET-LECLERC & LABEYRIE (1987) bereits in den 1970er und 1980er Jahren die wissenschaftliche Grundlage für die mögliche Eignung von Sauerstoffisotopenverhältnissen biogenen Opals als Paläothermometer. Die genannten Autoren entwickelten eine Paläotemperaturskala, welche auf $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten mariner Diatomeen basiert. Diese Arbeiten zeigten bereits die erheblichen präparativen Schwierigkeiten auf, die bei der Gewinnung der Diatomeenvalven aus einem Sediment und bei der Extraktion aller an den biogenen Opal angelagerten sauerstoffhaltigen Moleküle und Molekülgruppen vor der Zersetzung des Opals zu einem Messgas zu erwarten sind (JUILLET-LECLERC & LABEYRIE 1980 und 1982). Trotz erheblicher Schwierigkeiten konnten die Autoren den grundlegenden physiko-chemischen Zusammenhang zwischen dem Isotopenwert des Opalsauerstoffs und der Wassertemperatur im Zeitraum der Biomineralisation des Opals aufzeigen, der sich in vereinfachter Form folgendermaßen darstellt:

$$\alpha = 1 + \varepsilon$$

Dabei ist α der temperaturabhängige Fraktionierungsfaktor und ε die Isotopenfraktionierung, die näherungsweise $\delta^{18}O_{SiO2}$ minus $\delta^{18}O_{H2O}$ entspricht und in der δ-Nomenklatur als

$$\varepsilon = \frac{10^3 + \delta^{18}O_{SiO2} - 10^3 - \delta^{18}O_{H2O}}{10^3 + \delta^{18}O_{H2O}} * 10^3 = \frac{\delta^{18}O_{SiO2} - \delta^{18}O_{H2O}}{1000 + \delta^{18}O_{H2O}} * 1000$$

definiert ist und in ‰ angegeben wird (JUILLET-LECLERC & LABERYE 1987). Diese Beziehung führt aufgrund der Temperaturabhängigkeit bei der Fraktionierung zu einem Temperaturkoeffizienten τ, der wie folgt gegeben ist (wobei $\Delta\varepsilon$ die $\delta^{18}O$-Differenz des biogenen Opals unter Berücksichtigung des Isotopenquellwertes in dem betrachteten Temperaturintervall ΔT ist):

$$\tau = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T} \; [‰/°C]$$

Der Temperaturkoeffizient ist für paläoklimatische Fragestellung von großem Interesse, da er es ermöglicht, Temperaturveränderungen im Lebensraum der Diatomeen in der Vergangenheit zu quantifizieren, wenn zugleich Informationen über das Sauerstoffisotopenverhältnis des Wassers vorliegen.

Bisher existieren nur sehr wenige Studien zu dieser, für die Paläoklimaforschung äußerst wichtige Fragestellung. Je nach angewandter Analysetechnik ergaben sich Unterschiede in der absoluten Fraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal sowie daraus resultierend differierende Temperaturkoeffizienten, die in der Literatur - je nach Autor - zwischen -0,19 und -0,50 ‰/°C angegeben werden (LABERYIE 1974, JUILLET-LECLERC & LABEYRIE 1987, MATHENEY & KNAUTH 1989, CLAYTON 1992, SHEMESH et al. 1995, BRANDRISS et al. 1998, LÜCKE et al. 2003).
Die Gründe für die unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten sind bisher unklar. Neben den geschilderten Schwierigkeiten bei der Separation der Kieselschalen aus den entsprechenden Sedimenten und bei der Messgaserzeugung aus dem biogenen Opal haben sich auch Probleme bezüglich der Eichung des potenziellen Isotopenthermometers ergeben. SCHMIDT et al. (1997) konnten zeigen, dass zwischen dem biogenen Opal „frischer“ Planktonproben und solchem aus älteren Sedimenten eine systematische Isotopendifferenz auftritt, deren Ursache noch nicht geklärt werden konnte. Darüber hinaus fehlen längerfristige Eichstudien, welche z.B. saisonale Temperaturveränderungen in einem See zu den jeweils im biogenen Opal eingelagerten Isotopensignalen in Bezug setzen und das „Schicksal“ des Isotopenwertes von Diatomeen bis zur Ablagerung im Sediment verfolgen. Insbesondere über eine mögliche „biologische Fraktionierung“ liegen nur ungenügende Kenntnisse z.B. aus Diatomeenkulturversuchen im Labor vor (KRAUSKOPF 1959, RIMSTIDT & BARNES 1980, DOVE & RIMSTIDT 1994, MCMANAUS et al. 1995).

Neben den analytischen Problemen und der Frage nach der absoluten Fraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal bestehen zudem Unsicherheiten bei der Interpretation von Isotopenverhältniswerten des Opals von aus Sedimenten separierten Diatomeenvalven. Die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte solcher Proben stellen immer Mischsignale dar, da der biogene Opal einer Sedimentprobe immer das Akkumulationsergebnis von abgestorbenen Kieselalgen über einen längeren Zeitraum ist. Über diesen Akkumulationszeitraum, der im günstigsten Falle einem Ausschnitt einer Vegetationsperiode entspricht, variieren die Wassertemperatur und der Isotopenquellwert für die Fraktionierung ($\delta^{18}O_{H2O}$) in kleinen Seen z.T. beträchtlich. Diese Variationen erschweren es erheblich einen einfachen, linearen Bezug zwischen dem $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert einer Probe biogenen Opals und der zugehörigen Wassertemperatur in Verbindung mit dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers herzustellen.

2.4 Die Biologie der Diatomeen

Diatomeen (Kieselalgen) sind 2,5 µm bis 2.000 µm große, einzellige, photoautotrophe Algen, die eine charakteristische Kieselschale, das Frustulum, aus amorpher polymerisierter Kieselsäure aufbauen. Wissenschaftlich werden sie nach einer der ersten beschriebenen Arten (*Bacillaria paradoxa*) als *Bacillariophyceae* bezeichnet, wobei fast 100.000 Arten der beiden Ordnungen *Centrales* mit radialer und *Pennates* mit bilateraler Geometrie unterschieden werden. Diatomeen kommen in allen marinen, lakustrinen und fluviatilen Milieus vor und bilden häufig die wichtigste Klasse für die Primärproduktion in aquatischen Ökosystemen. Diatomeen haben einen erheblichen Anteil an der globalen Kohlenstofffixierung (DARLEY 1982, KRAMER 1986, MARTIN-JÉZÉQUEL et al. 2000, VAN DEN HOEK et al. 1993).

Das Frustulum der Diatomeen besteht aus einer Hypotheka (Schachtel) sowie einer Epitheka (Deckel), die die Hypotheka überlappt. Hypo- und Epitheka werden vom Cingulum (Gürtelband) zusammengehalten, das wiederum aus mehreren Elementen, den Copulae (Bänder) aufgebaut wird.

Die Epitheka weist zwei Unterteile auf. Die flache, an den Rändern gewölbte Epivalva (obere Schale) und die ringförmige Seitenwand, die als Epipleura (oberer Gürtel) bezeichnet wird. Entsprechend wird die Hypotheka in Hypovalva und Hypopleura unterteilt. Da die Valven starre, die lebendige Zelle umschließende Körper sind, erfolgt das Zellwachstum der Diatomeen indem sich Hypo- und Epitheka voneinander entfernen und sich immer neue Gürtelelemente zwischen den Schalen aufbauen (vgl. Abb. 3). Die Vermehrung der Kieselalgen erfolgt durch Zellteilung und geschlechtliche Fortpflanzung. Bei der Zellteilung trennt sich die größere Epitheka von der kleineren Hypotheka und beide, nun getrennte Einheiten, bilden jeweils neue, eigenständige Zellen. Bei diesem Vorgang verringert sich die Zellgröße, weil die Hypotheka der ursprünglichen Zelle nun die Epitheka der jüngeren Diatomee bildet. Schließlich wird eine artspezifische Minimalgröße erreicht, worauf die Zellverkleinerung durch die Bildung von Sporen abgelöst wird, aus denen eine neue Generation von Diatomeen heranwächst (VAN DEN HOEK et al. 1993).

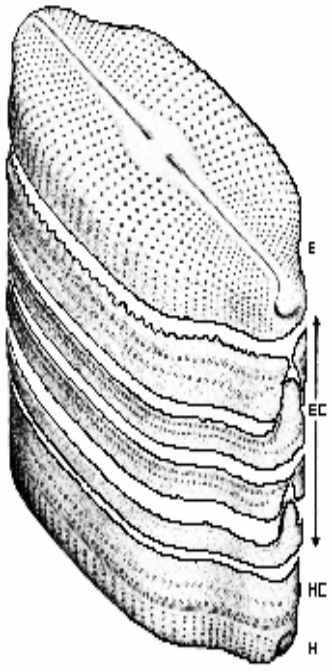


Abb. 3: Frustulum einer Diatomee der Familie *Navicula*;
(E) Epivalva,
(EC) Epicingulum mit 4 Copulae,
(HC) Hypocingulum,
(H) Hypovalve
(aus ROUND et al. 1990)

Neben Kohlenstoff, Sauerstoff und den Makronährstoffen Stickstoff und Phosphor ist Silizium ein weiterer Makronährstoff für Diatomeen. Während aus dem Gewässer aufgenommener Stickstoff und Phosphor von den Algen gespeichert werden, führt eine zu geringe Siliziumkonzentration des Wassers zu einem Blockieren der Zellteilung und damit zum Ende einer Diatomeenblüte. Angaben über wachstumslimitierende Siliziumkonzentrationen schwanken zwischen 51 µg/l für *Stephanodiskus minutus* und 1.143 µg/l für *Synedera filiformis* (LAMPERT & SOMMER 1993). LUND (1954) und JORGENSEN (1957) konnten nach KRAMER (1986) auch das Ende von Massenentwicklungen von *Asterionella formosa* mit einem Siliziumminimum im Seewasser parallelisieren. Der extrem hohe wachstumslimitierende Wert für *Synedera* deutet darauf hin, dass Silizium während saisonaler Diatomeenmaxima der limitierende Nährstoff ist. Allerdings sind vielfach die Kombination limitierender Ressourcen, nicht deren absolute Konzentration und Konkurrenzbedingungen im See für die Entwicklung der Algen verantwortlich. So existiert beispielsweise ein Trend zur Dominanz von Diatomeen gegenüber Grünalgen bei hohen Silizium/Phosphor-Verhältnissen und eine Abfolge von pennaten Arten, d.h. Arten mit gestreckter, nadelförmiger Geometrie zu zentrischen Arten, also Arten mit runder Valvengeometrie entlang des Silizium/Phosphor-Gradienten (TILMAN et al. 1982, LAMPERT & SOMMER 1993).

Planktonische Diatomeen können sich nicht aktiv fortbewegen und erreichen in lakustrinen Gewässern Dichten von bis zu 1,3 g/l. Ihre Schwebefähigkeit ist ein wichtiger selektiver Faktor, da Diatomeen als photoautotrophe Organismen darauf angewiesen sind, sich im lichtdurchfluteten euphotischen Bereich des Wasserkörpers aufzuhalten. Da die Dichte der Diatomeen generell höher ist als die des Wassers, kommt es zu Sinkprozessen, die häufig zu größeren Biomasseverlusten einer Population führen als durch den Fraß von Primärkonsumenten (HORN & HORN 2000). Die Sinkgeschwindigkeit einzelner Arten wird vor allem von ihrem Radius und ihrem Formwiderstand beeinflusst. Lange nadelförmige Kieselalgen sowie Arten, die Kolonieformen bilden, reduzieren durch ihre Morphologie den Sinkverlust. Zudem wirken die im Epilimnion eines Sees herrschenden Turbulenzen der Sedimentation entgegen, so dass die Algen in der Schwebe gehalten werden. Die tatsächlichen Populationsverluste durch Absinken werden von dem Verhältnis zwischen der maximalen windinduzierten Durchmischungstiefe des Gewässers und der Sinkgeschwindigkeit determiniert. Bei Freilandversuchen mit Sedimentfallen kalkulierte GRIES (1995, nach HORN & HORN 2000) Verluste zwischen 6 und 39 % aller lebenden und toten Zellen pro Tag.
Das Größenspektrum von Süßwasserdiatomeen reicht von ca. 5 µm einiger *Cyclotella* und *Cymbella* Arten bis hin zu maximalen Längen von ca. 500 µm einiger *Fragilaria* Arten. Valven von Fragilarien zeichnen sich zudem durch eine geringe Breite im Verhältnis zu ihrem Längenwachstum aus. So erreicht z.B. *Fragilaria brevistriata* bei einer maximalen Länge von ca. 45 µm lediglich eine Breite von 4 bis 7 µm (KRAMER & LANGE-BERTALOT 1991).

2.5 Der See als Transfersystem für Klimainformationen

Die Isotopensignatur von biogenem Opal hat aufgrund seines ubiquitären Vorkommens ein sehr großes Potenzial für die paläoklimatologische Forschung. Auch lakustrine Sedimente, deren z.T. nachweisbare feine Lamination eine gute Altersdatierung einzelner Sedimentsequenzen erlaubt, enthalten vielfach die amorphen, opalartigen Skelette von Diatomeen, den die Kieselalgen während ihres Wachstums aus dem Wasserkörper biomineralisiert haben. Das Isotopenverhältnis des in den Kieselschalen eingelagerten Sauerstoffs bildet dabei die Grundlage für eine mögliche Temperaturrekonstruktion.

Die Altersdatierung lakustriner Sedimente erfolgt häufig über die ^{14}C-Methode, wobei z.T. vorhandene Jahresschichtungen den Aufbau von Warvenchronologien gemäß jahrgenauer Kalender ermöglichen. Der geochronologische Begriff „Warve“ (schwedisch: varv = Schicht) für jahreszeitlich geschichtete Ablagerungen wurde bereits 1912 von DE GEER geprägt. Im Idealfall wechseln sich in Seen helle Sommerlagen aus autochthoner biogener Produktion (hauptsächlich Diatomeenvalven, Chrysophyceenzysten, organische Reste) und dunkle Winterlagen (im Wesentlichen aus allochthoner minerogener Sedimentzufuhr) ab (BATTARBEE 1981, ZOLITSCHKA 1990). Setzt man eine entsprechende Präparations- und Analysetechnik voraus, ist es möglich, den biogenen Opal einer einzelnen Warve zu separieren, dessen Sauerstoffisotopenverhältnis zu bestimmen und als Klimaproxieparameter zu verwenden.

Um die im biogenen Opal gespeicherten Klimainformationen interpretieren zu können, muss jedoch zunächst der Aufzeichnungs- und Ablagerungsmechanismus des als Proxie verwendeten Sauerstoffisotopensignals einer Warve verstanden werden. Diese Aufzeichnung erfolgt im Zuge des Schalenaufbaus und findet gemäß den theoretischen Überlegungen im Isotopenaustauschgleichgewicht mit dem Wasser statt. Für alle in der Warve enthaltenen Diatomeenvalven einer Art *V1* kann dies als

$$\delta^{18}O_{SiO2}(V1) = f\ (T, y, \beta)$$

dargestellt werden, wobei T die Wassertemperatur an einem Ort y repräsentiert, an dem die Valve biomineralisiert wurde. Da die Vermehrung der Kieselalgen außerdem von abiotischen Faktoren wie Nährstoff- und Lichtverhältnissen sowie von den biotischen Faktoren Konkurrenz und Fraß abhängig ist, müssen mit β auch biologische Parameter berücksichtigt werden. Die Summe aller in einer Vegetationsperiode gebildeten und zum Gewässergrund sedimentierten Diatomeenvalven kann damit als

$$\delta^{18}O_{SiO2}(\text{Sediment}) = \Sigma\ \delta^{18}O_{SiO2}(V1) \cdot f(T, y, \beta, t), \Sigma\ \delta^{18}O_{SiO2}(V2) \cdot f(T, y, \beta, t) \text{ usw.}$$

dargestellt werden und stellt ein integratives Isotopensignal des Zeitraumes der Vegetationsperiode t und über den Ortsvektor y dar (LÜCKE 1998).

In der Abbildung 4 ist der Aufzeichnungs- und Ablagerungsmechanismus sowie die Steuergrößen für die Aufzeichnung eines Klimasignals im Epilimnion eines kleinen Sees vereinfacht dargestellt. Aufgrund der sich im Jahresverlauf ändernden Globalstrahlung, die als eigentlicher Antrieb des Transfersystems angesehen werden muss, folgen sowohl Luft- als auch Wassertemperatur einem ausgeprägten Jahresgang. Das $\delta^{18}O_{H2O}$-Verhältnis des Seewassers, das den Quellwert für die Isotopenfraktionierung bei der Valvenbildung darstellt, wird durch das Zusammenwirken der einzelnen Glieder der Wasserhaushaltsgleichung bestimmt. Unterschiedliche Sinkeigenschaften oder partielle Valvenauflösungen einzelner Diatomeentaxa können während der Sedimentation zu einer Transformation des ursprünglichen, im Epilimnion aufgezeichneten, Isotopensignals führen. Darüber hinaus sind Veränderungen der Isotopensignatur bereits bei dem Absinken der Valven auf die Sedimentoberfläche bzw. durch frühdiagenetische Prozesse bei der Einlagerung der Valven in das Sediment, d.h. vor der endgültigen Archivierung, denkbar. Es wird deutlich, dass ein Proxieparameter aus lakustrinen Sedimenten, der als mögliches Klimasignal interpretiert wird, von einer Vielzahl von Faktoren und Prozessen abhängig sein kann.

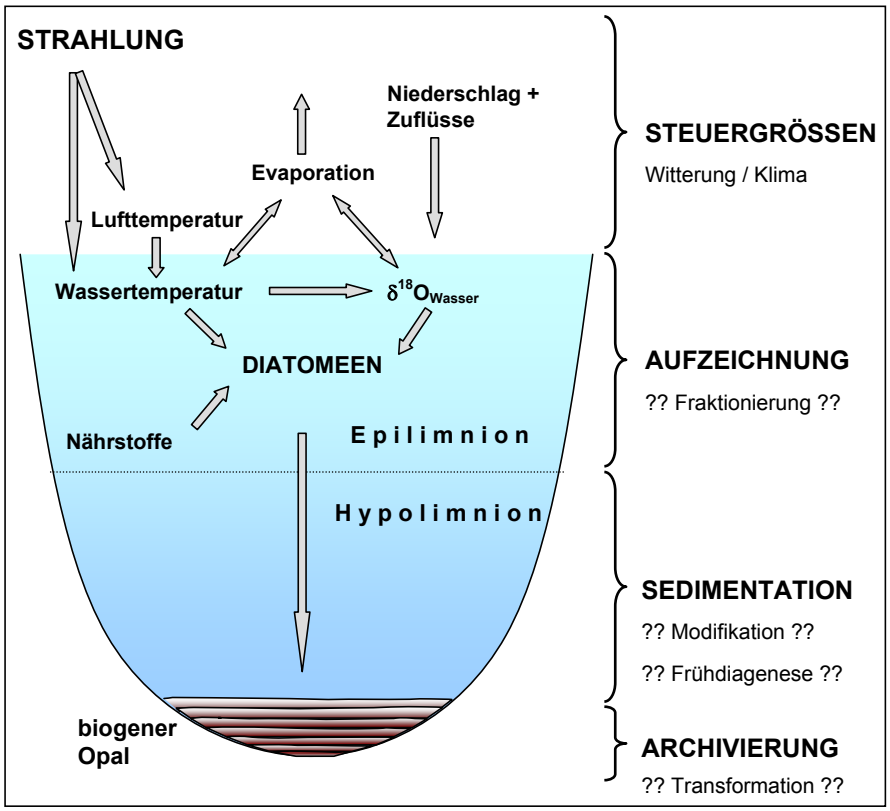


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des Aufzeichnungs- und Ablagerungsmechanismus von Klimasignalen in einem von Diatomeen besiedelten keinen See und Steuergrößen der Aufzeichnung (verändert nach LÜCKE 1998)

3 Der Untersuchungsraum

3.1 Naturräumliche Lage

Das mit seinem Wasserspiegel auf einer Höhe von 425 m ü. NN gelegene Holzmaar (50° 7´ N, 6° 52´ E; TK L5906, Daun) ist Teil des Westeifel-Vulkangebietes, wird der naturräumlichen Haupteinheit der Moseleifel zugezählt (PAFFEN, 1957) und befindet sich ca. 50 km nordöstlich von Trier. Das ebenfalls bearbeitete Meerfelder Maar (50° 6´ N, 6° 45´ E), dessen Wasserspiegel auf einer Höhe von 336 m ü. NN liegt und dessen Krater ca. 90 m tiefer in das Grundgebirge eingesprengt ist, befindet sich ca. 9 km südwestlich des Holzmaares und gehört zur gleichen naturräumlichen Einheit (vgl. Abb. 5).

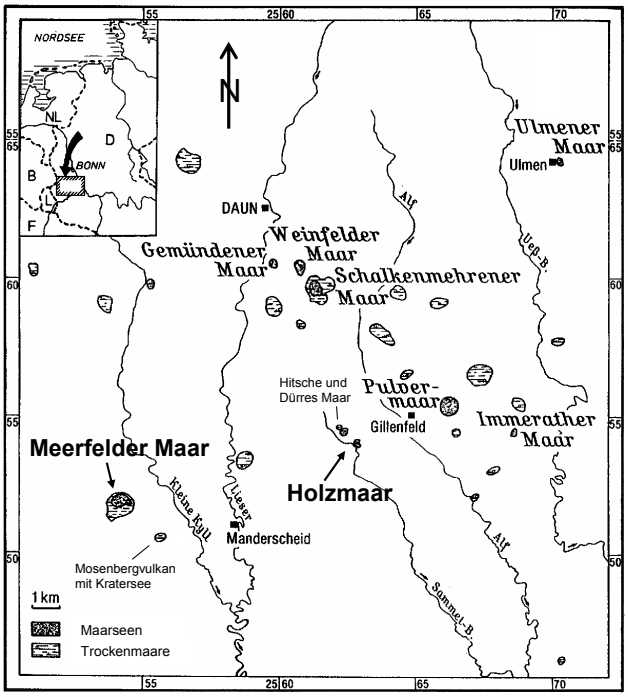


Abb. 5: Geographische Einordnung und Lage der untersuchten Maarseen im Westeifel-Vulkanfeld (verändert nach NEGENDANK & ZOLITSCKA 1993)

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden nur die wassergefüllten Maarkrater der Westeifel als Maare bezeichnet, wenngleich Maare nur über einen kurzen geologischen Zeitraum mit Wasser gefüllt sind. Die relativ hohe biologische Produktivität der Maarseen führt zu einer schnellen Verlandung. Von den heute über 50 nachgewiesenen Maaren der Westeifel weisen noch acht einen Maarsee auf. Alle übrigen Seen sind verlandet und z.T. nur noch als

schwach ausgeprägte Hohlform in der Landschaft erkennbar (LORENZ 1973, NEGENDANK 1983, MEYER 1985). Die Westeifel ist Teil des linksrheinischen Schiefergebirges und wird von flachgewellten, nach Süden abgedachten Hochflächen aufgebaut. Charakteristisch für die Morphologie sind tief eingeschnittene Täler mit Bächen und kleinen Flüssen, die nach Süden zur Mosel entwässern und die dieser Landschaft aufgesetzten vulkanischen Formen, wie z.B. die Basaltkuppen des Nerother Kopfes (647 m ü. NN) und des Mosenberges (517 m ü. NN). Demgegenüber sind die Maare der Westeifel mehr oder weniger tief in die Landoberfläche eingesprengt (NEGENDANK 1983, MEYER 1994).

Die Wissenschaft beschäftigte sich schon sehr früh mit dem Westeifel-Vulkanfeld. So sind die Maare der Eifel bereits seit 1820 (STEININGER) Gegenstand geologischer und geomorphologischer Forschung. Seit den Arbeiten von HALBFASS (1897) und THIENEMANN (1914), dem Mitbegründer der Limnologie, der an den Maarseen der Westeifel grundlegende Untersuchungen durchführte, sind diese auch Gegenstand limnologischer Forschung.

3.2 Geologie

Das Westeifel-Vulkanfeld ist das einzige quartäre Vulkanfeld Deutschlands und entstand im Zusammenhang mit der Bildung der großen Mitteleuropäischen Riftzone. Der prä-eruptive Untergrund besteht aus gefalteten und z.T. geschieferten devonischen Sedimenten der Siegen- und Ems-Schichten sowie aus diskordant auflagerndem, flachliegendem Buntsandstein der Trier-Bitburger-Mulde (Trias) im äußersten Südwesten (MEYER 1994, LORENZ & ZIMANOVSKI 2000).

Im Westeifel-Vulkanfeld wurden bisher ca. 270 einzelne vulkanische Förderorte erkannt, wobei es sich bei 50 bis 70 von ihnen um Maare handelt (LORENZ 1973, MEYER 1985, LORENZ & ZIMANOVSKI 2000). Der quartäre Vulkanismus der Westeifel setzte vor ca. 1 Million Jahren ein. Der älteste bisher datierte Vulkan „Auf dem Beul“ ist nach einer Kalium/Argon Datierung ca. 960.000 Jahre alt (LORENZ & ZIMANOVSKI 2000). Der jüngste Förderort in der Westeifel ist das Ulmener Maar, das vor ca. 10.000 Jahren ausbrach. Seine Altersbestimmung erfolgte durch ^{14}C-Datierungen an organischem Material aus dem Liegenden der Ulmener Maar Tephra sowie durch warvenchronologische Datierungen von Sedimenten älterer Maarseen (BÜCHEL & LORENZ 1982, ZOLITSCHKA & NEGENDANK 1995). Das Holzmaar und das Meerfelder Maar gehören ebenfalls zu den sehr jungen vulkanischen Formen der Westeifel, deren Entstehung auf 40.000 bis 70.000 Jahre BP (Holzmaar) bzw. 22.000 bis 29.0000 Jahre BP datiert wurde (BÜCHEL & LORENZ 1984, ZOLITSCHKA 1990). Eine genaue geologische Übersicht des Untersuchungsraumes gibt MEYER (1994).

3.2.1 Zur Entstehung von Maaren

Die Theorie über die Entstehung eines Maares hat sich im Laufe der geologischen Forschung geändert. Bis in die 1960er Jahre interpretierte man Maare als Gasexplosionstrichter CO_2-reicher Magmen und diskutierte die Bedeutung des Wassers für die Maargenese kontrovers (SCHMINCKE 2000).

Seit Anfang der 1970er Jahre wird die Entstehung eines Maares als Folge von sog. phreatomagmatischen Prozessen gedeutet, bei denen mächtige Wasserdampfexplosionen entstehen, wenn heiße Lava und wasserführende Schichten in direkten Kontakt kommen (LORENZ 1970 und 1973). Wenn die heiße Lava in größere Grundwasserkörper oder kleine wasserführende Täler eindringt, entstehen bis zu 2.000 m tief reichende Strukturen, die als Diatreme oder Durchschlagröhren bezeichnet werden. Durch den Druck der Explosion kommt es zu einem hydraulischen Zerbrechen des Nebengesteins, von dem große Brocken durch die Wasserdampfexplosion ausgeworfen werden. An der Oberfläche bildet sich zunächst ein relativ kleines Loch, das sich bei weiteren Explosionen stärker eintieft und durch gravitatives Nachbrechen erweitert wird, wobei zuletzt ein Durchmesser-Tiefen-Verhältnis des Diatrems von ca. 5:1 resultiert. Am Ende der explosiven Phase hat sich ein Maar mit einem charakteristischen Ringwall gebildet. Der Kraterboden wird von einer Nebengesteins- oder Kollapsbreckzie aus großen Gesteinsblöcken gebildet, der Ringwall besteht ebenfalls bis zu 90 % aus dem zerkleinerten Nebengestein und nur zu einem geringen Anteil aus vulkanischem Material (BAUDRY & CAMUS 1970, LORENZ 1970 und 1973, LORENZ & BÜCHEL 1978, NEGENDANK 1983).

Im Jahre 1977 konnte in Alaska die Genese der beiden Ukinrek Maare beobachtet werden. Dabei vollzog sich die Entstehung des östlichen Ukinrek Maares innerhalb von nur zehn Tagen. Nach der eruptiven Phase füllte sich das Maar, das bei einem Durchmesser von 300 m ca. 70 m tief ist, sehr rasch mit einem heute ca. 30 m tiefen See (KIENLE et al. 1980).

Auch bei den Maaren der Westeifel handelt es sich um in den prä-eruptiven Untergrund eingesprengte vulkanische Formen, die sich nach dem Ende der eruptiven Phase mit Grundwasser füllten. Im Laufe der Zeit füllten sich die so entstandenen Maarseen zunächst mit dem Material des Ringwalls und darauf hin immer stärker auch mit biogenem Material, bis sie schließlich verlandeten und in ihrer weiteren Geschichte z.T. von jüngeren Sedimenten bedeckt wurden. Die Abfolge der Lithozonen reicht von der Nebengesteinsbreckzie in der Wurzelzone des Diatrems über Brekzien des jungen Ringwalls, Turbidite und später Laminite, bis sich bei der Verlandung des Maarsees Torfe bilden (MEYER 1985, SUHR & GOTH 2002).

3.3 Klima

Das Klima der Moseleifel wird durch die großräumige Zirkulation der mittleren Breiten und deren Wechselwirkungen mit der Topographie bestimmt. Der Einfluss von sowohl maritimen als auch kontinentalen Luftmassen bewirkt, dass das Klima des Raumes unter den gegensätzlichen Auswirkungen ozeanischer und kontinentaler Einflüsse steht, wobei der maritime Einfluss vor allem in den milden Wintern erkennbar wird. Der Klimacharakter der Moseleifel kann als feuchttemperiert mit kühlen Sommern und feuchten Wintern bezeichnet werden (CLOSS 1979). Die Jahresmitteltemperatur der Luft beträgt an der Klimastation Manderscheid 7,5 °C, das Januarmittel liegt bei -1,0 °C, das Julimittel bei 16,0 °C. Die mittlere Zahl der Eistage (T max. <0 °C) liegt bei 21, die Zahl der Sommertage (T max. ≥25 °C) liegt bei durchschnittlich 30 bis 40 (DWD 1978).

Die Niederschläge sind vorwiegend an westliche Strömungen gebunden. Gleichwertige Maxima im Sommer und Winter stehen einem Minimum im März/April und im September/Oktober gegenüber. Infolge der gebirgsartigen Topographie spiegelt die räumliche Differenzierung der Niederschläge deutlich die Luv- und Leegebiete wider, wobei die jährlichen Niederschlagssummen zwischen 750 und 980 mm betragen. Das Jahresmittel des Niederschlags an der Klimastation Manderscheid beträgt 846 mm (BJELANOVIC 1967, DWD 1978).

3.4 Böden, Vegetation und Bevölkerung

Aus den verschiedenen im Untersuchungsraum anstehenden Gesteinen entstanden unter dem Einfluss von Klima, Hydrologie und Vegetation sehr unterschiedliche Böden. In den ebenen bis leicht geneigten Lagen entwickelten sich aus umgelagerten Lößlehmen und den devonischen Ausgangsgesteinen im wesentlichen Braunerden. Aufgrund der geringen Lößbedeckung und den anstehenden Sedimentgesteinen neigen diese Böden zur Versauerung, Podsolierung und Vernässung. In den steileren Lagen des stark gegliederten Raumes führten im Pleistozän laterale Materialverlagerungen durch solifluidale Prozesse zur Bildung periglazialer Deckschichten. In Abhängigkeit vom Relief und dem Verbreitungsmuster der materialliefernden Gesteine sowie von der Menge des in das Substrat eingetragenen äolischen Materials sind sowohl die stoffliche Zusammensetzung als auch die Struktur dieser periglazialen Lagen kleinräumlich differenziert. Auf den Deckschichten bildeten sich flach- bis mittelgründige Ranker, Pseudogleye oder Stagnogleye, die sich häufig kleinräumig abwechseln. Auf den zudem kleinräumig vorkommenden vulkanischen Ausgangsgesteinen entwickelten sich mittelgründige Braunerden, die gute Nährstoff- und Feuchteverhältnisse aufweisen (FETZER et al. 1995).

Die natürlichen Pflanzengesellschaften der Moseleifel sind sommergrüne Laubwälder, Schluchtwälder und vereinzelte Auenwälder. Von den nährstoffarmen bzw. grund- und stauwasserbeeinflussten Standorten abgesehen, ist die Rotbuche (*Fagus sylvatica*) in diesen Waldgesellschaften die dominante Art.
Die Pflanzengesellschaft mit der größten Verbreitung ist der Hainsimsen-Buchenwald (*Luzulo-Fagetum*), wobei lokalklimatische und vor allem edaphische Standortunterschiede zu kleinräumlich wechselnden Artengarnituren führen (HUTTER et al. 1995). Auf flachgründigen Rankern und podsolierten Braunerden bilden bodensaure Eichenmischwälder (*Quercion roboris*), auf flachgründigen, trockenen Standorten dagegen Buchen-Eichen-Mischwälder (*Fago-Quercetum petraeae*) die potenzielle natürliche Vegetation. In den eingeschnittenen Tallagen mit feuchten, nährstoffreichen Böden überwiegen dagegen Eschen-Ahorn-Schluchtwälder (*Aceri pseudoplatani-Fraxinetum exelsioris*). In den Überschwemmungsbereichen der Bäche und Flüsse treten zudem Hainmieren-Erlen-Auenwälder (*Stellario nemori-Alnetum glutinosae*) auf (KLINK & SLOBODDA 1994, MERTZ 2000).
Der potenziellen natürlichen Vegetation entsprechende sommergrüne Laubwälder existieren heute in der Moseleifel nicht mehr. Bei den erhaltenen Laubwaldbeständen ist die Baumschicht durch forstliche Maßnahmen mehr oder weniger stark verändert. Derzeit sind etwa 45 % der Moseleifel mit Wäldern bestockt, wobei vor allem Fichten-Monokulturen und artenarme Buchenwälder die potenzielle natürliche Vegetation abgelöst haben (SCHWIND 1983, POTT 1996). 43 % der Fläche der Moseleifel wird heute überwiegend als Wiese und Weide und teilweise ackerbaulich genutzt, wobei die landwirtschaftlich genutzte Fläche in ganz Rheinland-Pfalz in den letzten 50 Jahren stark zurückgegangen ist (STATISTISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ 2001).

Die Moseleifel wird seit mindestens 7.000 Jahren durch den Menschen besiedelt, wenngleich auch einige Fundstellen aus dem Mesolithikum (Mittelsteinzeit) existieren (LÜNING & STEHLI 1989). Während des holozänen Klimaoptimums begann der Übergang vom Jäger und Sammler zu sesshaften Wirtschaftsformen. Bäuerliche Wirtschaftsformen breiteten sich in Mitteleuropa von Südosten kommend im 6. Jahrtausend v. Chr. aus und kennzeichnen den Beginn der Jungsteinzeit, die die Moseleifel in der jüngeren Bandkeramikerzeit um 5.300 v. Chr. erreichte. Entsprechende Keramikfunde aus der Eifel sind auf 5.000 v. Chr. datiert, beschränken sich jedoch auf das Moseltal und seine randlichen Höhenlagen bis ca. 300 Metern über NN (LÜNING & STEHLI 1989).
Die Maare der Westeifel befanden sich während der Bandkeramikerzeit am Rand der Einzelfundzone, so dass es bereits zu dieser Zeit zu einer ersten episodischen bis periodischen Anwesenheit des Menschen an den Seen kam (ZOLLITSCHKA 1990 nach LÖHR 1989). Bis zum Beginn der Eisenzeit um 500 v. Chr. war der Einfluss des Menschen auf die

Maarseen und deren Umgebung jedoch sehr gering. Die episodische Nutzung der Wälder zur Holzgewinnung und als Waldweide sowie kleinräumige Brandrodungen zur Bereitstellung ackerbaulich nutzbarer Flächen waren sehr beschränkt. Siedlungsaktivitäten in direkter Umgebung der Maarseen sind aus dieser Zeit nicht bekannt (VON ZABERN 1977).

Erst während der römischen Periode entstanden Siedlungen direkt an den Maarseen. In diese Phase fallen auch planmäßige, großflächige Rodungen mit einhergehender verstärkter Waldnutzung und der Ausweitung des Ackerbaus, der z.T. bis an die Ufer der Seen heran reichte. Römische Siedlungen sind aus der direkten oder näheren Umgebung aller Maarseen bekannt (VON HAAREN 1992). Der Zusammenbruch des Römischen Reiches um 400 n. Chr. führte zu einem erheblichen Rückgang der Bevölkerung bei gleichzeitiger Wiederzunahme der Waldflächen. Erst im Hochmittelalter drang der Mensch erneut verstärkt in die Hochlagen der Eifel ein, und im Zuge der karolingischen Landnahme kam es zu einem erneuten Anstieg der Besiedlungsdichte. Systematische Rodungen und intensive Urbarmachungen führten dabei zu einer Verteilung von Wald- und Ackerflächen, der auch die heutige Verteilung von Wäldern und landwirtschaftlich genutzter Flächen entspricht (HASEL 1985).

Im frühen 19. Jahrhundert wurden auch die Waldbestände aufgrund von Hungersnöten zur Streugewinnung sowie zum Waldfeldbau genutzt. Übernutzung führte Ende des 19. Jahrhunderts zur Degradation der Wälder und zur Zunahme verheideter Flächen. Durch intensive Bemühungen der preußischen Regierung und gegen den Willen der Eifelbauern wurde im Übergang zum 20. Jahrhundert planmäßig mit Fichten aufgeforstet. Die Waldbestände erholten sich, wobei die ehemaligen Laubwälder der Moseleifel durch Fichtenforste und artenarme Buchenwälder abgelöst wurden (WENZEL 1962, SCHWIND 1983, MERTZ 2000).

Heute ist die Moseleifel durch eine relativ dünne, disperse Besiedlung gekennzeichnet. Land- und Forstwirtschaft prägen das Landschaftsbild. In jüngerer Zeit spielt der Tourismus eine immer größere wirtschaftliche Rolle. Die zwischen Meerfelder Maar und Holzmaar gelegene Stadt Manderscheid bildet dabei ein touristisches Zentrum der Moseleifel.

3.5 Holzmaar und Meerfelder Maar

Das vor etwa 40.000 bis 70.000 Jahren durch eine phreatomagmatische Eruption entstandene Holzmaar ist Teil der Maargruppe Holzmaar, Dürres Maar und Hitsche und als einziges dieser Maare noch heute mit einem nahezu kreisrunden Maarsee gefüllt (BÜCHEL 1984). Der eigentliche Maarkrater hat eine Fläche von 0,43 km^2 und besitzt einen gut erhaltenen Kraterwall, der lediglich im Südwesten unterbrochen ist (vgl. Foto 1, Anhang). Das Einzugsgebiet des Maarsees erstreckt sich vorwiegend in nordwestlicher Richtung und hat eine Fläche von 2,25 km^2. Einziger Zulauf ist der Sammetbach, der in einer flachen Talmulde verläuft und nach ca. 2 km in das Holzmaar mündet. Die größte Reliefenergie im

Einzugsgebiet beträt 50 m, die des Sammetbaches beträgt von seiner Quelle bis zur Mündung in den See lediglich 35 m (SCHARF 1987, OEHMS 1995). Der heutige 58.000 m^2 große Maarsee hat einen maximalen Durchmesser von 325 m und wurde an seinem südwestlichen Ufer aufgestaut, um die südlich des Sees gelegene Holzmühle kontinuierlich mit Wasser zu versorgen. Dieser Aufstau geschah nach ZOLITSCHKA (1990) bereits im 19. oder sogar im 18. Jahrhundert. In der Übersichtskarte von Gillenfeld von 1856 ist bereits der südwestlich des eigentlichen Kratersees gelegene Flachwasserbereich mit einer geraden Begrenzung im Südosten zu erkennen. Der den See umgebende Kraterwall ist hauptsächlich mit Beständen von *Fagus sylvatica* (Rotbuche) und *Picea abies* (Fichte) sowie zum geringen Teil mit *Quercus petraea* (Traubeneiche) bepflanzt. Direkt am Seeufer treten *Salix* sp. (Weide) und *Alnus glutinosa* (Schwarzerle) auf. Der See wird von einem 1 bis 3 m vom Gewässer entfernt angelegten Fußweg umgeben. Im Einzugsgebiet des Sees beträgt der Anteil bewaldeter Flächen ca. 39 %, der Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen ca. 52 %. Der See gliedert sich in das ca. 20 m tiefe Becken im Maarkrater und einen Flachwasserbereich im Südwesten, in den der Sammetbach mündet und den er ca. 80 m von seiner Mündung entfernt wieder verlässt (vgl. Abb. 6).

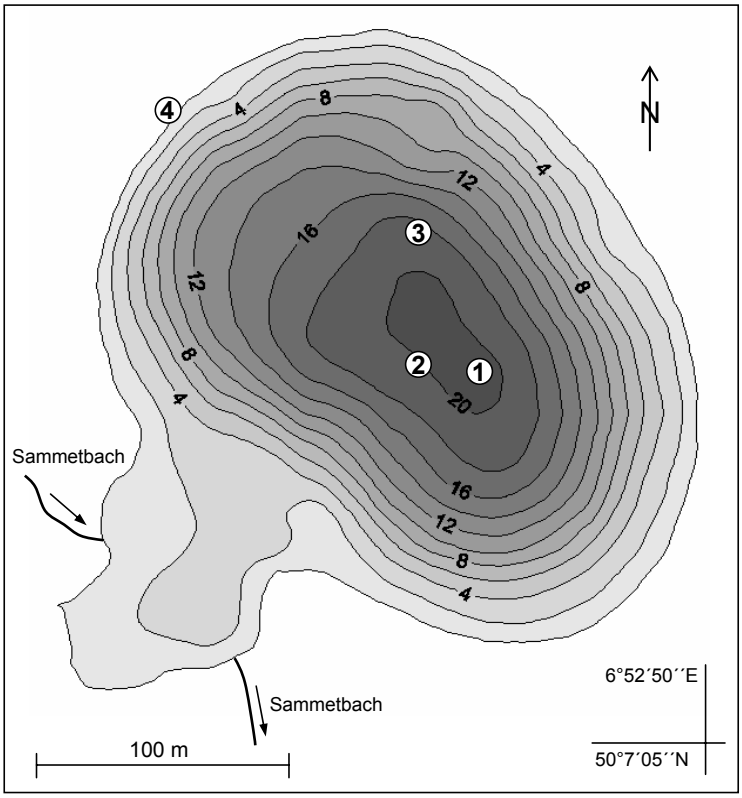


Abb. 6: Bathymetrische Karte des Holzmaares; ① Sedimentfallen des Hauptsystems, ② Sedimentfallen des Zusatzsystems, ③ Klimastation, ④ Quelle

Durch die Unterbrechung des Kraterwalls ist der See im wesentlichen Winden aus westlicher und südwestlicher Richtung ausgesetzt, während er ansonsten durch den hohen Wall vom Wind relativ abgeschirmt ist (OEHMS 1995). Der Flachwasserbereich und Teile des Ufers sind mit Röhrichtzonen mit *Phragmites* sp. (Schilf), *Juncus* sp. (Binse) und *Ranunculus* sp. (Hahnenfuß) bewachsen. Zudem ist ein Gürtel submerser Vegetation ausgebildet, in dem *Myriophyllum spicatum* (Tausendblatt), *Myriophyllum alterniflorum* (Wechselblütiges Tausendblatt) und *Ranunculus peltatus* (Schild-Wasserhahnenfuß) dominieren (MELZER 1992). Der See wird als dimiktisch und holomiktisch beschrieben, seine Wassererneuerungszeit beträgt ca. sieben Monate, wobei der Zufluss des Sammetbaches unberücksichtigt ist (SCHARF & OEHMS 1992, OEHMS 1995). Im Nordwesten befindet sich in unmittelbarer Nähe des Ufers eine kleine Quelle, die zwischen 1999 und 2001 jeweils zwischen Anfang Juli und Ende September versiegte. Seit dem Frühsommer 2001 setzte die Quellschüttung entgegen den Erwartungen zu keinem Zeitpunkt wieder ein, was möglicherweise auf Forstarbeiten am nordöstlichen Tuffring zurückzuführen ist, bei denen der Boden im Bereich der Quelle mit schweren Traktoren verdichtet wurde. Die wichtigsten Kenndaten des Sees sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Da das ca. 22.000 bis 29.000 Jahre alte (BÜCHEL & LORENZ 1984) Meerfelder Maar lediglich zum räumlichen Vergleich herangezogen wird, soll an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet werden. Eine genaue Beschreibung des Meerfelder Maares findet sich in SCHARF (1987). Die wichtigsten Kenndaten des Sees sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Hydrographische und morphometrische Kenndaten von Holzmaar und Meerfelder Maar nach verschiedenen Autoren (Daten aus SCHARF 1987, SCHARF & MENN 1992, OEHMS 1995, ZOLITSCHKA & NEGENDANK 1995)

	Holzmaar	Meerfelder Maar
Lage	6° 53´ E/50° 7´ N	6° 45´ E/50° 6´ N
Seespiegel ü. NN [m]	425,1	336,5
Einzugsgebiet ohne A_0 (FE) [km^2]	2,25/0,37*	1,53
Seeoberfläche (A_0) [m^2]	58.000	256.000
Umgebungsfaktor (f_u)[1]	34,5/6,4*	5,0
Volumen (V) [$10^6 m^3$]	0,51	2,31
Maximale Tiefe (Z_{max}) [m]	20	17
Mittlere Tiefe (z_m)[2] [m]	8,8	9,0
Maximale subaquatische Hangneigung [m]	32,0	7,0
Abfluss [$10^6 m^3$/a]	0,87	998,0
Theoretische Wassererneuerungszeit [a]	0,6	2,3
Trophiegrad	mesotroph	eutroph
Erbohrtes Sediment [m]	32	46

* ohne Sammetbach
[1] f_u = Einzugsgebiet [m^2] / Seeoberfläche [m^2]
[2] z_m = Volumen [m^3] / Seeoberfläche [m^2]

4 Feld- und Labormethoden

4.1 Probenahme (Feldarbeit)

Die Feldarbeit am Holzmaar erfolgte in den Jahren 1999 bis 2002. Sie diente der Erlangung eines möglichst breiten Basiswissens über die sich mit den Jahreszeiten ändernden exogenen Einflüsse auf das Gewässer und die hieraus resultierenden zeitlich-räumlichen limnologischen Veränderungen im Wasserkörper des Sees. Das dieser Arbeit zugrunde liegende Untersuchungsspektrum beinhaltet daher sowohl Aufzeichnungen meteorologischer Größen zur Beschreibung des Mikroklimas unmittelbar über der Wasseroberfläche als auch über den gesamten Untersuchungszeitraum durchgeführte *in situ*-Messungen ökologischer Parameter über ein Tiefenprofil in der Seemitte. Gleichzeitig fanden eine Beprobung des gesamten Wasserkörpers (alle 2 m von der Oberfläche bis zur Sedimentoberfläche) und eine kontinuierliche Probenahme aller Zuflüsse des Sees statt. Einen Überblick über die aufgezeichneten Daten und die Probenahme gibt die Tabelle 2.

Tab. 2: Überblick über die aufgezeichneten Daten und die Probenahme am Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes

Kompartiment	**Größe**	**Probenmenge**	**zeitlich-räumliche Auflösung**
ATMOSPHÄRE Erfassung saisonaler Veränderungen der meteorologischen Größen	Globalstrahlung Lufttemperatur rel. Luftfeuchte Niederschlagsmenge Windgeschwindigkeit		30 Minuten
	$\delta^{18}O_{H2O}$ Niederschlag	100 ml	14 Tage
SEE sowie ZU- u. ABLÄUFE Erfassung der korrespondierenden Größen	Wassertemperatur Unterwasserstrahlung pH-Wert Sauerstoffgehalt Nährstoffe $\delta^{18}O_{H2O}$-Wasser $\delta^{18}O_{SiO2}$-Diatomeen	 2 x 50 ml 100 ml variabel	14 Tage alle 2 m 14 Tage alle 2 m 28 Tage 7, 16 m

4.1.1 Hydrologisch-limnologische in situ-Untersuchungen

Wassertemperatur, pH-Wert und Konzentration des gelösten Sauerstoffs wurden *in situ* alle 2 m entlang eines Tiefenprofils in der Seemitte bestimmt. Dabei diente eine Positionsboje, die mit einem Grundgewicht in der Seemitte verankert ist, als fixer Ankerpunkt für das Schlauchboot, von dem aus alle Untersuchungen durchgeführt wurden. Die Temperatur und der pH-Wert wurden mit einer kombinierten Messeinheit (Syland Scientific GmbH; Modell

pH-350) bestehend aus einem Doppelthermistorsystem mit einer relativen Genauigkeit von ±0,2 °C sowie einer Einstabmesskette mit Gelfüllung und einer relativen Genauigkeit von ±0,01 pH ermittelt. Die Messung der Konzentration des gelösten Sauerstoffs erfolgte durch eine aktive Silber-Blei-Elektrode (Syland Scientific GmbH; Modell 4002-FS) mit einer absoluten Genauigkeit von ±0,1 %. Zur Bestimmung der Sichttiefe nach SECCHI diente eine Sichttiefenscheibe (Hydrobios Apparatebau GmbH, SECCHI-Scheibe). Zur Erfassung des fotosynthetisch aktiven Wellenlängenbereichs der Globalstrahlung (PAR - photosyntetically active radiation / 400 bis 700 nm) kam ein Unterwasser-Quantumsensor (Li-Cor; Modell LI-193SA) mit einer relativen Genauigkeit von ±3 % zum Einsatz. Die Messungen erfolgten alle 14 Tage entlang des Tiefenprofils in der Seemitte, wobei zur Erfassung der PAR alle 50 cm und nur bis zu einer Tiefe von 7 m jeweils ein Messwert erzeugt wurde.

4.1.2 Gewinnung von Wasserproben

Die Wasserproben wurden mit einem Zwei-Liter-Standardwasserschöpfer nach Ruttner (Hydrobios Apparatebau GmbH, Standard-Wassersammler No. 436 132) alle 2 m entlang des Tiefenprofils in der Seemitte gewonnen.

Zur Bestimmung des Sauerstoffisotopenverhältnisses des Wassers wurde jeweils eine PE-Flasche mit einem Volumen von 100 ml bis zum Überlaufen befüllt, um einen Isotopenaustausch zwischen Luft-CO_2 und der gewonnenen Wasserprobe zu vermeiden. Zur Messung der Konzentration der gelösten Kationen Aluminium, Eisen, Kalium, Kalzium, Natrium, Magnesium, Mangan und Silizium sowie der gelösten Anionen Chlorid, Nitrat, Phosphat und Sulfat wurde jeweils eine PE-Flasche mit einem Volumen von 250 ml befüllt.

Soweit ausreichend Niederschlag gesammelt werden konnte, wurden Proben mit der Prioritätenfolge Isotope, Kationen und Anionen gewonnen. An den Probenahmestandorten Sammetbach (ca. 50 Meter vor der Einmündung in den Flachwasserbereich des Sees), Quelle (sehr kleine Quelle am nördlichen Seeufer mit periodischer Schüttung) und Ablauf wurden die gleichen Messungen und Beprobungen durchgeführt. Um mögliche Beeinträchtigungen der Proben durch Erwärmen zu verhindern, erfolgte deren Transport in Kühlboxen. Noch am Tag der Probenahme wurden alle Wasserproben zur Bestimmung der gelösten Nährstoffe Al, Ca, Cl, Fe, K, Na, Mg, Mn, NO_3, PO_4, Si und SO_4 über einen Cellulosenitratfilter mit einer Porenweite von 0,45 µm filtriert und jeweils 50 ml des Filtrats in PE-Flaschen gefüllt. Die Proben zur Analyse der Kationen wurden daraufhin mit 1 ml Salpetersäure (65 %, Suprapur) versetzt. Ihre Analyse erfolgte mittels ICP-MS mit Analysefehlern von ±5 bis maximal ±20 %. Zur Analyse der Anionen wurden ebenfalls jeweils 50 ml des Filtrats aus PE-Flaschen verwendet. Ihre Analyse erfolgte mittels Ionenchromatographie mit einem Analysefehler von ±3 %, ohne dass eine Probenvorbehandlung notwendig wurde. Alle Wasserproben wurden bis zur jeweiligen Analyse bei -25 °C in Kühltruhen gelagert.

4.1.3 Gewinnung von rezenten Sedimentproben

Die über einen Zeitraum *x* in der Wassersäule eines Sees in die Tiefe absinkenden partikulären Stoffe werden als rezentes Sediment bezeichnet. Rezente Sedimentproben wurden im Holzmaar während des gesamten Untersuchungszeitraumes in einem zweiwöchigen Rhythmus aus einer Wassertiefe von 3, 7 und 16 m gewonnen (Winterpause bei Eisbedeckung).

Hierzu dienten selbstkonstruierte Sedimentfallen nach BLOESCH & BURNS (1980), die aus 100 cm langen PE-Rohren mit Becherboden bestehen und einen Innendurchmesser von 10 cm aufweisen. Durch das Verhältnis von 10:1 zwischen Länge und Durchmesser der Fallen ist gewährleistet, dass sich mögliche Turbulenzen im Wasserkörper nicht auf den Auffangbereich der Fallen übertragen, womit Sedimentaufwirbelungen vermieden werden. Die unteren 20 cm der Fallen bestehen aus einem abnehmbaren PE-Becher, der fest mit dem Rohr verbunden ist und durch das Lösen eines Haltestiftes vom Rohr entfernt werden kann. Am oberen Rand des Bechers sowie bei einer Rohrhöhe von 50 cm befinden sich 1,2 cm große Öffnungen, durch welche überstehendes Wasser bei dem Herausheben einer Falle aus dem See ablaufen kann, ohne dass auf dem Boden des Bechers akkumuliertes Sediment aufgewirbelt wird. Jeweils zwei dieser Fallen sind durch ein Edelstahlgestell zu einem Fallenpaar verbunden und werden durch ein 5 kg schweres Edelstahlgewicht am unteren Ende des Gestells und eine PE-Boje, deren Auftrieb das Gewicht des Fallenpaars überschreitet, aufrecht im See installiert. Zur Positionierung der Sedimentfallen in der gewünschten Wassertiefe dient ein PE-Seil, mit dem Boje und Falle verbunden sind. Drei Fallenpaare in 3, 7 und 16 m Wassertiefe bilden ein Sedimentfallensystem, das mit Edelstahlkarabinern an einer Positionsboje befestigt wird, die mit einem Grundgewicht wenige Meter neben der Seemitte-Positionsboje verankert ist. Zusätzlich zu den Sedimentproben dieses sog. Hauptsystems wurden in den Jahren 2001 und 2002 auf gleiche Weise Zusatzproben in der unmittelbaren Nähe des Hauptsystems gewonnen.

Zur Entleerung der Fallenpaare müssen diese aus dem See in das Schlauchboot gehoben werden. Nach dem Ablaufen des überstehenden Wassers können die Becher problemlos abgenommen und das akkumulierte Sediment in 1000 ml PE-Flaschen überführt werden. Das Fallenpaar wird darauf hin bei geringer Verschmutzung vor Ort gereinigt oder durch ein sauberes Fallenpaar ersetzt und erneut in der entsprechenden Wassertiefe verankert. Die Überführung der Proben ins Labor erfolgt in Kühlboxen. Nach einer Absetzzeit von 12 Stunden wird des überstehende Wasser abdekantiert, woraufhin ein weiteres Absetzen über acht Stunden sowie ein erneutes Dekantieren erfolgt. Die eingeengten Proben werden bei einer Temperatur von -25 °C tiefgefroren, anschließend gefriergetrocknet und bis zur weiteren Bearbeitung bei einer Temperatur von -25 °C gelagert.

4.2 Meteorologische Daten

Mit dem Beginn der Prozessstudie am Holzmaar im Juli 1994 wurde eine automatische Wetterstation nahe der Seemitte direkt über der Wasseroberfläche installiert (vgl. Foto 2, Anhang). Die Station besteht aus einem Datenaufzeichnungsgerät (Daten-Logger) und Sensoren zur Registrierung der meteorologischen Größen Globalstrahlung, Lufttemperatur, relativen Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie einem Niederschlagsmengenmessgerät und wurde auf einer Stahlboje (Weiseler Bojen- und Maschinenbau OHG; Markierungsboje WB 1000) angebracht (vgl. Foto 2, Anhang). Die Wetterstation zeichnet seit 1994 die genannten meteorologischen Größen in einem dreißigminütigen Aufzeichnungsintervall auf. Bei dem Aufzeichnungsgerät handelte es sich um einen batteriebetriebenen Daten-Logger (Delta-T Devices LTD; Modell DL 2), der maximal 60 Eingangskanäle für beliebige Sensoren und 128 KB Speicherplatz für bis zu 64.000 Einzelwerte besitzt. Die aufgezeichneten Daten werden über eine serielle Schnittstelle auf ein Notebook übertragen.

Zur Messung der Globalstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 350 und 1.100 nm (sichtbares Licht: 380-750 nm; photosynthetisch aktiver Wellenlängenbereich: 350-750 nm), diente ein ein Meter über der Seeoberfläche angebrachtes Pyranometer (Skye Instruments LTD; Modell SKS 1.110) mit einer Siliziumfotozelle als Strahlungsdetektor. Die Messgenauigkeit beträgt ±5 % absolut.

Die zur Messung von Lufttemperatur (°C) und relativer Luftfeuchte (%) ebenfalls einen Meter über der Seeoberfläche angebrachte kombinierte Lufttemperatur-Luftfeuchte-Einheit (Skye Instruments; Modell SKH 2.011) ist zum Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung in einem Lamellen-Schutzgehäuse eingebaut. Die Temperaturmessung erfolgt mit einer Fehlertoleranz von ±0,2 °C über einen Thermistor. Zur Messung der relativen Luftfeuchte mit einer Toleranz von ±2 % wird ein Hygrograph eingesetzt. Der Niederschlag wird mittels eines Kippwaagensystems mit einer Auffangfläche von 200 cm^2 mit einer auf die Fläche bezogenen Auflösung von 0,1 mm gemessen (Hydrometrie GmbH; Modell RG 50). Zusätzlich wird eine selbstentworfene, vor direkter Sonnenstrahlung geschützte Vorrichtung zur Sammelung des Niederschlages verwendet. Die Messung der Windgeschwindigkeit [m/s] erfolgt mit einem Schalenanemometer (Seba Hydrometrie GmbH; Modell RG 50) mit einer minimalen Ansprechgeschwindigkeit von 0,25 m/s und einer Messgenauigkeit von ±1 %.

Der Daten-Logger sowie alle angeschlossenen Sonden und Messgeräte arbeiteten über den gesamten, dieser Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungszeitraum einwandfrei, wobei zwei zweiwöchige Datenverluste jeweils aus Bedienungsfehlern resultieren (23. Mai bis 05. Juni 2000: Programmierfehler / 05. bis 18. Dezember 2000: Verlust der Batteriespannung).

4.3 Separation von Diatomeenvalven aus rezenten Sedimenten mittels SPLITT-Fraktionierung

Zur Separation von Diatomeenvalven aus den im Holzmaar gewonnenen rezenten Sedimentproben kam ein in der Arbeitsgruppe Isotopengeochemie und Paläoklima des Institutes Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG-V) des Forschungszentrums Jülich entwickeltes Verfahren zum Einsatz, das die quantitative Separation der Valven aus Sedimenten ermöglicht. Bei dieser sog. SPLITT-Fraktionierung (split-flow lateral-transport thin separation) (GIDDINGS 1985) handelt es sich um ein präparatives Verfahren zur Auftrennung von Partikelgemischen in Suspensionen, das auf den unterschiedlichen hydrodynamischen Eigenschaften verschiedener Materialien in einer laminaren Strömung beruht (GIDDINGS 1985, CONTADO et al. 1997, FUH 2000). Dabei werden im Falle der Sedimentfänge aus dem Holzmaar die Diatomeenvalven aufgrund unterschiedlicher Sinkgeschwindigkeiten von Mineralkörnern getrennt (RINGS et al. 1999, RINGS 2002, RINGS et al. 2004).

Die Separation erfolgt in drei Verfahrensschritten:

1. Aufschluss und Suspendierung des gefriergetrockneten Sediments:

Bevor eine Sedimentprobe mittels Siebung in verschiedene Korngrößenfraktionen geteilt werden kann, muss sie auf möglichst schonende Weise von organischer Substanz befreit werden, da diese zur Aggregatbildung neigt und daher die feinen Siebporen bzw. den Kanal der SPLITT-Zelle verschließen kann. Zur Zerstörung der organischen Substanz und Suspendierung einer rezenten Sedimentprobe wird diese daher über 24 Stunden mit Wasserstoffperoxyd (H_2O_2) behandelt. Eine möglichst große Menge jeder Probe (ca. 0,8 bis 1,0 g) wird mit entionisiertem Wasser befeuchtet und anschließend mit H_2O_2 (30 %, pro Analysis) bei 60 °C behandelt und minutenweise in einem schwachen Ultraschallbad geschwenkt. Um mögliche karbonatische Spuren zu entfernen, wird die Probe zudem mit HCl (32 %, pro Analysis) versetzt und anschließend durch mehrfaches Waschen und Zentrifugieren bei 3.500 Umdrehungen pro Minute von der durch die HCl verursachte Salzfracht und Resten des Wasserstoffperoxyds befreit.

2. Nasssiebung:

Um Diatomeenvalven quantitativ von mineralischen Partikeln trennen zu können, werden die suspendierten Sedimentproben in die fünf Korngrößenfraktionen <5 µm, 5-10 µm, 10-20 µm 20-80 µm und >80 µm geteilt, von denen die Fraktionen 5-10 µm, 10-20 µm und 20-80 µm zur Extraktion der Valven verwendet werden. Die Nasssiebung erfolgt mit einer Vibrationssiebmaschine (Fritsch GmbH, Analysette 3) und einer zugehörigen Mikrosiebeinheit mit 4 Mikropräzisionssieben (Fritsch GmbH, chemisch geätzte Nickelfolien-Siebe) mit den Maschenweiten 5, 10, 20 und 80 µm. Dabei wird die Sedimentprobe durch eine von der Siebmaschine induzierte Vertikalschwingung von 2 bis 3 mm in Intervallen von fünf bis

sieben Sekunden immer wieder von der Sieboberfläche angehoben, um verstopfte Sieb-poren freizulegen. Eine suspendierte Probe wird zunächst auf das 80 µm-Sieb gegossen. Darauf hin wird so lange mit entionisiertem Wasser gespült, bis das aufgefangene Spülwasser klar ist. Nun wird mit dem 20 µm-Sieb die Fraktion 20-80 µm aus dem Spülwasser abgetrennt. Auch hier wird so lange mit Wasser nachgespült, bis das Spülwasser klar ist. Um das Ergebnis der Nasssiebung zu beurteilen, wird die 20-80 µm-Fraktion unter dem Lichtmikroskop auf Reste kleinerer Partikel untersucht. Bei gutem Trennergebnis wird ein Dauerpräparat angefertigt (Einbettungsmittel Naphrax) und die Fraktion bei -25 °C eingefroren. Befinden sich noch Partikel <20 µm in der Probe, wird diese nochmals mit schwachem Ultraschall behandelt und so lange weiter gesiebt, bis keine Partikel <20 µm mehr in der Fraktion enthalten sind. Dieses Vorgehen wird mit den Korngrößenfraktionen 10-20 µm und 5-10 µm wiederholt, wobei das Spülwasser, das die Fraktion <5 µm enthält, verworfen wird. Zur Siebung einer Probe werden ca. 250 Liter entionisiertes Wasser benötigt. Der Zeitbedarf zur Auftrennung einer Probe in die fünf Korngrößenfraktionen variiert je nach eingesetzter Menge sowie dem Tongehalt der Probe zwischen 20 und 40 Arbeitsstunden. Das Abtrennen der 5-10 µm-Fraktion erfordert etwa 70 % der Arbeitszeit.

3. Separation der Diatomeenvalven:

Nach der Trennung einer Probe in fünf Fraktionen erfolgt die eigentliche Separation der Diatomeenvalven. Dabei wird das Partikelgemisch horizontal durch die sog. SPLITT-Zelle (FFFractionation, Salt Lake City, Model SF1000HC) gepumpt. Die SPLITT-Zelle besteht aus einem sehr flachen rechteckigen Kanal mit den Maßen 20 x 4 x 0,0371 cm (L, B, H), der oben und unten durch eine Glasplatte und seitlich durch eine Kunststofffolie begrenzt wird. An Ein- und Ausgang der Zelle wird der ca. 371 µm hohe Kanal durch einen ca. 124 µm dicken Trennkeil (splitter) aus Edelstahlblech horizontal unterteilt (vgl. Abb. 7). Beidseitig auf dem Trennkeil aufgeklebte ca. 124 µm dicke Kunststofffolien (Mylar-Folie) führen zu einer Höhe des SPLITT-Kanals von ca. 371 µm.

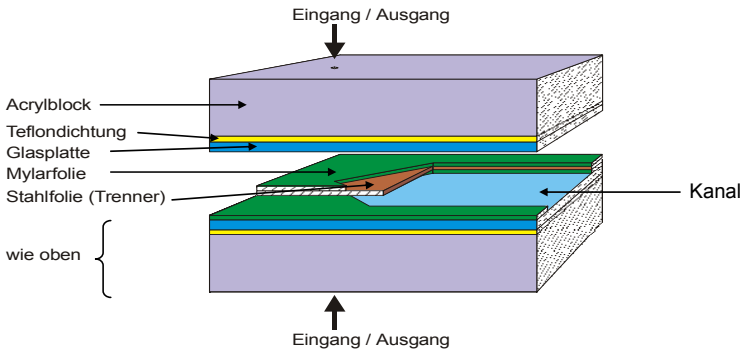


Abb. 7: SPLITT-Zelle in schematischem Aufriss - Darstellung nicht maßstabsgetreu (verändert nach RINGS 2002)

Die in der Arbeitsgruppe zur Verfügung stehende SPLITT-Zelle ist für die Partikeltrennung von Korngrößen zwischen 5 und 100 µm konstruiert. Bei einem Trennvorgang wird die Probensuspension mit Hilfe einer Schlauchpumpe (Ismatec GmbH, BVP Isomate) kontinuierlich an Eingang a´ in die Zelle gepumpt. Gleichzeitig wird ein Transportmedium (entionisiertes H_2O mit 1 % Ethanol und 0,1 % Tensid) mit einer Zahnradpumpe (Ismatec GmbH, RegloZ) kontinuierlich durch Eingang b´ in die Zelle gepumpt. Aufgrund der höheren Fließrate von Teilstrom b´ wird die Partikelsuspension an die Decke der Zelle gedrückt. Während ihres weiteren Transports durch die Zelle sinken die Partikel bedingt durch das Einwirken der Gravitationskraft und ihrer hydrodynamischen Eigenschaften unterschiedlich schnell ab, wobei die Zeit, die den Partikeln zur Auftrennung zur Verfügung steht, durch die Fließraten an Eingang a´ und b´ vorgegeben wird. Auf der Ausgangsseite trennt sich der Gesamtstrom durch den Ausgangstrennkeil in zwei Teilströme, wobei Partikel, die während des Transports nur wenig abgesunken sind, durch Ausgang a eluieren und Partikel, die unter den Trennkeil abgesunken sind, durch Ausgang b abgeleitet werden (vgl. Abb. 8).

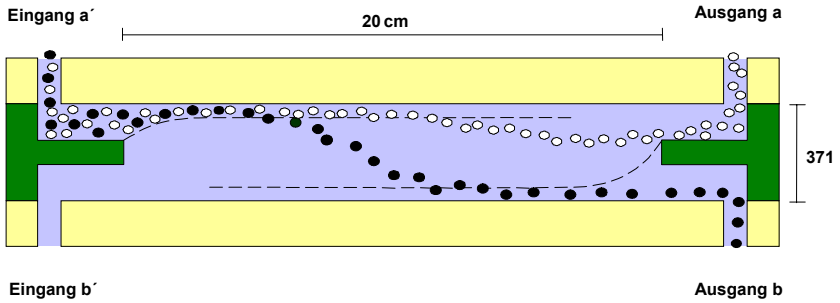


Abb. 8: SPLITT-Zelle im Schnitt - schematische Darstellung, nicht maßstabsgetreu (verändert nach RINGS 2002)

Planktonische Diatomeen bilden Geometrien aus, die eine im Vergleich zu ihrem Volumen große Oberfläche aufweisen, um durch größtmögliche Reibung ein langsames Absinken im Wasserkörper zu erreichen (vgl. Kap. 2.4). Diese Tendenz, im Verhältnis zur Größe relativ langsam abzusinken, ermöglicht es, Diatomeenvalven mit der SPLITT-Fraktionierung von Mineralkörnern ähnlicher Korngröße abzutrennen (RINGS 2004). Während die Valven als Teilprobe A durch den Ausgang a strömen, sinken die Minerale unter den Trennkeil und werden als Teilprobe B durch den Ausgang b abgeleitet. Die Teilproben werden über einem 5 µm-Sieb eingeengt und der Trennerfolg unter dem Lichtmikroskop begutachtet. Befinden sich noch größere Mengen von Mineralen in der Teilprobe A, wird der Trennvorgang iterativ wiederholt, bis der mineralische Anteil mit <3 % vernachlässigbar gering ist. Nach dem Trennvorgang werden Dauerpräparate von beiden Teilproben angefertigt (Einbettungsmittel Naphrax), die Teilproben bei -25 °C tiefgefroren und anschließend gefriergetrocknet.

4.4 Isotopenanalytik

4.4.1 Bestimmung der Sauerstoffisotopenverhältnisse von biogenem Opal

Die Bestimmung des Sauerstoffisotopenverhältnisses von biogenem Opal erfolgte nach der quantitativen Überführung des Opals in Kohlenstoffmonoxid mittels Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (IRMS, **I**sotope **R**atio **M**ass **S**pectrometry). Bei diesem Verfahren, bei dem das aus dem biogenen Opal freigesetzte und isotopisch gemischte Kohlenstoffmonoxidgas entsprechend seinem Masse-Ladungsverhältnis getrennt wird, erfolgt die Messung der stabilen Isotope in Form von Relativmessungen zwischen dem Probengas und einem Referenzgas. Im IRMS wird das zu vermessende Gas als viskoser Gasstrom durch eine Glaskapillare zu einer 1.500 °C heißen Glühkathode mit Wolframdraht (Ionenquelle) geleitet, an der die eintretenden Moleküle ionisiert werden. In dem viskosen Strom, bei dem die mittlere freie Weglänge der Moleküle geringer ist als die Kapillardimensionierung, reißen sich die Moleküle gegenseitig mit und diffundieren nicht gemäß ihrer Masse. So wird gewährleistet, dass beim Transport des Messgases durch die Kapillare keine Isotopenfraktionierung auftritt. Anschließend werden die Ionen beschleunigt und zu einem Ionenstrahl gebündelt. In einem Trennrohr erfolgt die magnetische Ablenkung des Ionenstrahls, wobei Ionen unterschiedlicher Massen unterschiedlich stark abgelenkt und so in nebeneinander angeordnete Kollektoren geleitet werden. Das Isotopenverhältnis des Gases errechnet sich aus der Umwandlung von elektrischen Signalen proportional zu der Anzahl der in den Kollektoren auftreffenden Ionen.

Alle Isotopenmessungen des biogenen Opals erfolgten mit dem IRMS *Optima* (Micromass Ltd.) mit Doppeleinlasssystem, durch das den Massenkollektoren abwechselnd ein Proben- und ein Referenzgas zugeführt werden. Da es bei längerer Verwendung eines Referenzgases zu Fraktionierungen der Isotope kommen kann und die für die Ablenkung des Messgases notwendige starke elektromagnetischen Spannung nicht konstant ist, wurde mit jeder Messung von Diatomeenvalven ein gegen den internationalen Standard NBS28 (National Bureau of Standards, USA) kalibrierter Laborstandard (Merk KgaA, Diatomit) eingesetzt, wodurch Referenzgasproben zur Kalibrierung des jeweils erzeugten Probengases zur Verfügung standen.

Der nach der internationalen δ-Nomenklatur als $\delta^{18}O$ in Promille [‰] angegebene Isotopenverhältniswert einer Probe errechnet sich aus dem Vergleich der Probe mit dem Standard nach folgender Nomenklatur:

$$\delta^{18}O\,[‰] = \left[\frac{(^{18}O/^{16}O)_{Probe} - (^{18}O/^{16}O)_{Standard}}{(^{18}O/^{16}O)_{Standard}} \right] * 1000$$

Alle Angaben in dieser Arbeit beziehen sich auf den international gebräuchlichen Standard V-SMOW (vgl. Kap. 2.1).

4.4.2 Bestimmung der Sauerstoffisotopenverhältnisse von Wässern

Die Bestimmung des Sauerstoffisotopenverhältnisses der Wasserproben erfolgte ebenfalls mittels IRMS in Kombination mit einem automatischen Peripheriegerät (Analytical Precision, AP Gilson) im „continuous-flow" Betrieb. Im Gegensatz zur Isotopenanalytik beim biogenen Opal kommt hierbei Kohlenstoffdioxid als Mess- bzw. Referenzgas zum Einsatz.

Vor der Analytik mittels IRMS erfolgte eine Proben-Vorpräparation. Dabei wurde jeweils 1 ml einer Wasserprobe in verschraubbare Glasröhrchen (Labco Limited Ltd., Exetainer) mit einem Volumen von 5 ml einpipettiert. Nach der Zusammenstellung von ca. 140 Proben in zum Gilson-System zugehörigen Probenbänken wurden diese zusammen mit einer entsprechenden Anzahl von Schraubdeckeln mit Septumstopfen in einen Handschuhsack (Merk KgaA, Glove-Bag) überführt, der daraufhin luftdicht verschlossen und mit einer Membranpumpe evakuiert wurde. In den evakuierten Handschuhsack wurde sodann ein Gasgemisch bestehend aus 5 % hochreinem Kohlenstoffdioxid (CO_2 4.8) und 95 % hochreinem Helium (He 5.6) geleitet, das sich über die Wasserproben in den Glasgefäßen schichtete. Nach ca. 5 Minuten wurde mit dem luftdichten Verschrauben der Fläschchen begonnen.

Die so vorbereiteten Proben lagerten über 24 Stunden in einem bei ca. 22 °C temperiertem Raum. In dieser Zeit kommt es zu einer vollständigen Äquilibrierung zwischen den Sauerstoffisotopen des Wassers und denen des Kohlenstoffdioxids der fünfprozentigen CO_2-Atmosphäre. Da die Austauschfraktionierung [$CO_2 \leftrightarrow H_2O$] bei 22 °C und der $\delta^{18}O_{CO2}$-Wert der Gasatmosphäre bekannt sind, lässt sich nach vollständigem Isotopenaustausch durch die Messung des neu eingestellten $\delta^{18}O_{CO2}$-Wertes der Gasatmosphäre auf das $\delta^{18}O_{H2O}$-Verhältnis des Wassers rückschließen. Die Vermessung des äquilibrierten CO_2 gegen einen CO_2-Standard erfolgte über den automatischen Probengeber „Gilson", der das CO_2 durch das Septum aus dem jeweiligen Glasröhrchen entnimmt und dem IRMS zuführt, wobei die Gase abwechselnd in einem Heliumträgergasstrom in das IRMS geleitet werden. Um zu gewährleisten, dass reines, von der Luftfeuchtigkeit der Gasatmosphäre befreites CO_2 in das IRMS gelangt, wird der Gasstrom durch eine für Wassermoleküle permeable Membran geleitet, die alle Wassermoleküle entfernt. Die Analysen erfolgen automatisch und aufeinanderfolgend. Die einzelnen Analysewerte ergeben sich aus dem Vergleich der Probe mit dem Standard, wobei der eigentliche Messwert durch die Mittelung von drei Wiederholungsmessungen aus jedem Probenröhrchen erfolgt. Jede Wasserprobe wurde zweifach vermessen, und die Analyse im Falle einer Differenz von mehr als 0,15 ‰ wiederholt, was lediglich in ca. 5 % aller Fälle notwendig war. Die Umrechnung der Rohwerte auf die V-SMOW Skala erfolgte über eine Mehrpunkteichung gegen mindestens zwei unterschiedliche Standardwässer mit bekanntem Sauerstoffisotopenverhältnis.

5 Die Hochtemperaturzelle *HTZ* - Methodenentwicklung zur quantitativen Extraktion von Sauerstoff aus biogenem Opal

Zur Sauerstoffisotopenbestimmung von biogenem Opal stehen bisher unterschiedliche Präparationstechniken zur Verfügung, die in den 1980er Jahren entwickelt wurden und auf dem chemischen Aufschluss der Silizium-Sauerstoff-Bindung durch Fluorinierung mit F_2 bzw. HF, BrF_5 oder ClF_3 in Nickelzylindern bei 500 bis 650 °C beruhen. Der freigesetzte Sauerstoff wird anschließend über heißem Graphit in CO_2, das als Messgas dient, umgesetzt.
Das Verfahren der schrittweisen Fluorinierung (HAMZA & EPSTEIN 1980, HAIMSON & KNAUTH 1983) wurde von THORLEIFSON & KNAUTH (1984) weiterentwickelt und beruht auf der schrittweisen Umsetzung des biogenen Opals. Dabei reagieren zunächst die äußeren, sauerstoffaustauschenden Schichten des Opals, deren Isotopenwert unberücksichtigt bleibt. Im Verlauf der weiteren Reaktion wird ein „Isotopenplateau“ erreicht, dessen $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert dem Isotopenverhältniswert des stabilen, von externen Sauerstoffverunreinigungen geschützten Opals entspricht.
Die Technik des kontrollierten Isotopenaustausches mit anschließender Fluorinierung wurde von JUILLET-LECLERC & LABEYRIE (1987) entwickelt. Hierbei wird eine Probe vor der Fluorinierung unter kontrollierten Bedingungen bei ca. 180 °C mit Wasserdampf bekannter Isotopenzusammensetzung äquilibriert. Durch die Differenz der isotopischen Zusammensetzung des Wasserdampfes vor und nach der Behandlung der Probe kann der ermittelte Isotopenwert des Opals nachträglich korrigiert werden.
Die größte Schwierigkeit bei diesen Präparationstechniken besteht in der vollständigen Abtrennung aller an den biogenen Opal angelagerten sauerstoffhaltigen Moleküle oder Molekülgruppen sowie in der Abtrennung von Verunreinigungen mit Resten organischer Substanz, die ebenfalls Sauerstoff enthält. Da durch sauerstoffhaltige Moleküle ein Isotopenaustausch mit dem aus dem Opal freigesetzten Sauerstoff zu erwarten ist, der das $\delta^{18}O_{SiO2}$-Signal des Opals verfälscht, muss die vollständige Abtrennung dieser Verbindungen sichergestellt sein bevor der chemische Aufschluss des Opals erfolgen kann (LÜCKE et al. 2002).

Um die geschilderten Schwierigkeiten bei der Präparation zu vermeiden und zudem auf die sehr aufwendige und gefährliche Fluorinierung zu verzichten, wurde im Rahmen dieser Arbeit in der Arbeitsgruppe Isotopengeochemie und Paläoklima des Institutes „Chemie und Dynamik der Geosphäre“ (ICG-V) des Forschungszentrums Jülich ein neues Verfahren zur quantitativen Extraktion von Sauerstoff aus biogenem Opal entwickelt. Es besteht in der Reduktion von SiO_2 durch hochreinen Graphit bei hohen Temperaturen. In der hierzu konstruierten sog. Hochtemperaturzelle (HTZ), in der Temperaturen von bis zu ca. 2.200 °C erreicht werden können, wird der biogene Opal quantitativ zu Kohlenstoffmonoxid (CO)

umgesetzt. Dieses Gas, dessen Sauerstoffisotopenverhältnis aufgrund der vollständigen Umsetzung des biogenen Opals in CO und SiC exakt dem Sauerstoffisotopenverhältnis des Opals entspricht, dient als Messgas bei der anschließenden Bestimmung des δ^{18}O-Wertes im IRMS (SCHLESER et al. 2000).

Bevor die HTZ als valides Aufschlussgerät zu einem routinemäßigen Einsatz kam, wurde eine Vielzahl von Versuchsreihen durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden. Als Kalibrierungs- und Testmaterialien wurden biogener Opal unterschiedlicher Herkunft, ein anorganisches Oxyd (Quarz) sowie Flaschengasfüllungen mit CO verwendet:

• Kieselgur (Laborstandard)	- gereinigt (Merck)	- biogen
• *Fragialria crotonensis*	- Diatomeen aus einer Laborkultur	- biogen
• *Cyclotella meneghiniana*	- Diatomeen aus einer Laborkultur	- biogen
• *Ethmodiscus rex*	- Diatomeen aus dem Sediment der Weddell See, Alter: 4Ma	- biogen
• Sedimentfallenmaterial	- Holzmaar (Westeifel)	- biogen
• NBS28	- Quarzsand, IAEA Wien (National Bureau of Standards, USA)	- minerogen
• CO-Flaschengas	- Reinheitsgrad 4.7 (Messer-Griesheim)	

5.1 Aufbau der HTZ

Die zentrale Einheit der HTZ besteht aus einer zylindrischen Hülse und einem innenliegenden Probenhalter mit locker aufliegendem Deckel aus Sigradur (HTW - Hochtemperatur-Werkstoffe GmbH, Sigradur-Glaskohlenstoff; zum Material siehe DÜBGEN & POPP 1984). Eine Bohrung am oberen Ende des Probenhalters dient als sog. Probenkammer und nimmt die Probe auf. Hülse und Probenhalter werden ineinander geschoben, in eine als Kühleinheit verwendete doppelwandige Quarzglaszelle (Vycor Quarzglas, Corning - USA) eingebracht und nach dem Anlegen eines Vakuums von $<10^{-3}$ mbar induktiv aufgeheizt. Dabei erzeugt die mittels eines Mittelfrequenzgenerators (Hüttinger, TIG 10/300) angekoppelte Energiedichte ein Magnetfeld, wodurch der Probenhalter induktiv aufgeheizt wird, der zuvor eine Probe in einer Bohrung im Zentrum des Induktionsfeldes und damit im heißesten Bereichs des Probenhalters aufgenommen hat. Zur Abführung der bei dem Aufheizvorgang entstehenden Strahlungswärme wird die doppelwandige Glaszelle während der gesamten Heizphase ständig von Kühlwasser mit einer Temperatur von 8 °C durchströmt (vgl. Abb. 9 und Fotos 3 und 4, Anhang). Der Extraktionsprozess zur Freisetzung des Sauerstoffs aus dem biogenen Opal wird von der Evakuierung der Probenkammer bis zur Zersetzung des biogenen Materials durch einen PC gesteuert. Außerdem soll die manuelle Einheit, in die zzt. jede Probe einzeln eingebracht werden muss, mittelfristig durch einen Multiport (automatische Einheit zur Beschickung mit mehreren Proben hintereinander) ersetzt werden, um im online-Modus eine größere Anzahl von Proben automatisch aufschließen und analysieren zu können.

5.2 Ablauf eines Aufschlusses

Zur Erzeugung einer Kohlenstoffmonoxidprobe wird eine Mischung aus ca. 1,5 mg Probenmaterial (z.B. Diatomeenvalven) und 1,2 mg Graphitpulver in die Probenkammer gefüllt, die anschließend in die Glaszelle integriert und bis zu einem Vakuum von $<10^{-3}$ mbar evakuiert wird. Über die rechnergesteuerte schrittweise Aufheizung erfolgen daraufhin die Probenvorpräparation und der eigentliche Aufschluss des Opals. In einer zunächst bis zu einer Temperatur von ca. 1.030 °C verlaufenden sog. thermischen Vorkonditionierung der Probe werden alle sauerstoffhaltigen Verunreinigungen desorbiert und zu CO und in geringem Maße zu CO_2 oxidiert, wobei diese Produkte kontinuierlich und bis zur Druckstabilität bei $<10^{-3}$ mbar abgepumpt werden.

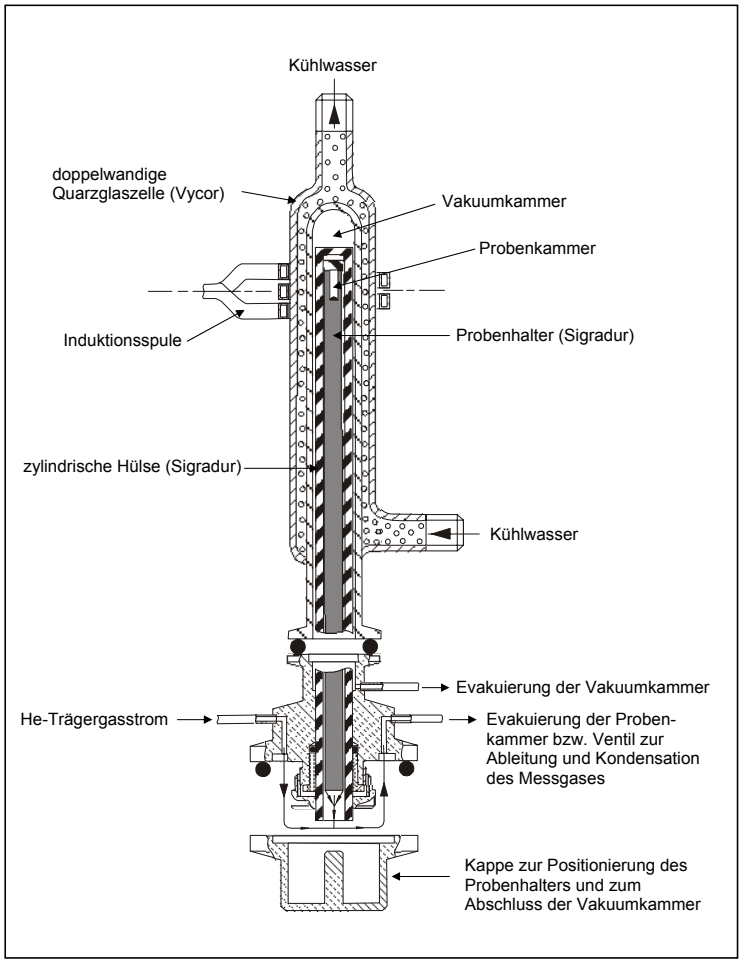


Abb. 9: Schematische Darstellung der Hochtemperaturzelle (HTZ)

Die Abmessungen der einzelnen Komponenten der HTZ sind wie folgt gegeben:

- effektives* Volumen der Vakuumkammer: ~14 ml
- Volumen der Probenkammer: ~71 µl
- effektives* Gesamtvolumen der Sigradurkammer: ~110 µl
- Abmessungen der Probenkammer: Ø =3 mm; Tiefe = 10 mm
- Sigradurkammer: Øaußen = 12 mm; Øinnen =7 mm; Länge =190 mm
- Probenhalter: Øaußen =7mm; Länge =175 mm
- Quarzrohr: Øinnen = 16 mm; Länge = 150 mm

* 'effektiv' gibt das Volumen an, welches den jeweils freien Gasraum charakterisiert

Anschließend wird die HTZ durch das Schließen eines hydropneumatischen Ventils von der zugehörigen Vakuumeinheit getrennt und die Temperatur des Probenhalters schrittweise bis auf ca. 1.530 °C erhöht, wobei sich der aus dem biogenen Opal freiwerdende Sauerstoff durch den Graphit zu CO umgesetzt wird und als weitere Verbindung Siliziumkarbid entsteht, welches sich als Feststoff niederschlägt. Bei einer Einwaage von 1,5 mg biogenem Opal entsteht in der HTZ ein CO Gasdruck von ca. 9,0 mbar (vgl. Abb. 10).

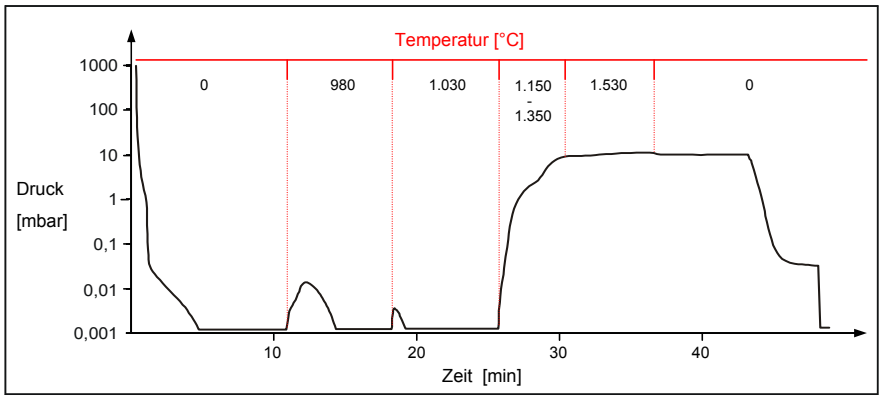


Abb. 10: Verlauf der Gasentwicklung in der HTZ beim Aufschluss von biogenem Opal; die ersten beiden Spitzen sind auf die Pyrolyse von Verunreinigungen zurückzuführen. Ihre Flächen dokumentieren nicht die Menge des freigesetzten Gases, da der Weg zur Vakuumeinheit geöffnet ist und fortwährend Gas abgepumpt wird. Erst der Druckanstieg nach ca. 25 min. markiert die Abkopplung der Vakuumeinheit und die anschließende Oxidation des biogenen Opals. Der Druckabfall auf <0,01 mbar wird durch das Einkondensieren des entstandenen Messgases in das Probenröhrchen hervorgerufen; der abschließende Druckabfall dokumentiert das Abpumpen des in der HTZ verbliebenen Restgases (<0,5 %).

Nach der Abkühlung des entstandenen Gases wird dieses in ein mit flüssigem Stickstoff gekühltes Glasröhrchen, das ein Molekularsieb (Merk KGaA, Molekularsieb 5Å) enthält, einkondensiert, wobei ein maximaler Restdruck von $<5 \cdot 10^{-2}$ mbar in der HTZ verbleibt, was der Einkondensierung von ca. 99,5 % der produzierten Gasmenge entspricht. Das Glasröhrchen wird anschließend mit einem Gasbrenner abgeschmolzen und an das Einlasssystem des IRMS angeschlossen. Auf diese Weise wir ein Kontakt der CO-Gasprobe mit atmosphärischem Sauerstoff ausgeschlossen.

5.3 Generatorleistung und Aufschlusstemperatur

Zur Ermittlung der Temperatur im Probenraum des Probenhalters war es notwendig, die Leistungsstufen des Generators im Hinblick auf die damit verbundene jeweils eingekoppelte Energie zu kalibrieren. Die Messung der Temperatur erfolgte mit einem Quotientenpyrometer (GS-Laborgeräte, Chopper-Q2-Pyrometer 500) in einer speziell hierfür konstruierten Glaszelle mit planem, einwandigem oberen Fensterabschluss und seitlichem Kühlwasserauslass. Das Quotientenpyrometer wurde von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) im Temperaturbereich von ca. 1.000 bis 2.300 °C geeicht. Vier von der PTB ermittelte Kalibrationspunkte, die die Temperatur als Funktion der Spannung am Spannungsausgang des Pyrometers liefern, sind in der Tabelle 3 aufgeführt.

Tab. 3: Von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ermittelte Temperaturwerte als Funktion der Spannung am Ausgang des Quotientenpyrometers

T/°C	U/V
1062,6	-1,661
1592,6	-3,320
2100,7	-5,200
2323,0	-6,072

Der gesamte Leistungsbereich des Generators wurde bei einer schrittweisen Leistungssteigerung von 5 % zwischen 0 und 100 % durchfahren, um die Temperaturcharakteristik der HTZ aufzunehmen. Die aus diesen Messungen und den Werten der PTB (vgl. Tab. 3) resultierende Kalibrationskurve zwischen der Generatorleistung in Prozent und der Temperatur im Bereich der Probenkammer, ermöglicht die Angabe der Aufschlusstemperatur (vgl. Abb. 11).

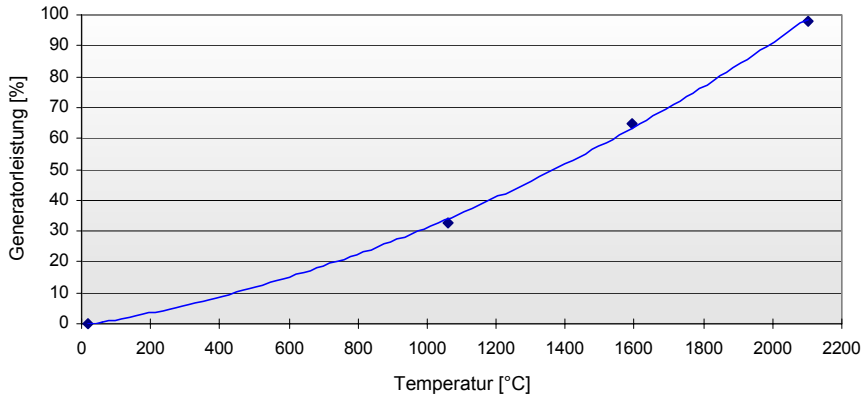


Abb. 11: Kalibrierungskurve zur Bestimmung der Temperatur in der Probenkammer der HTZ mit Hilfe der eingestellten Generatorleistung

Der leicht gekrümmte Kurvenverlauf geht auf die minimal nichtlineare Lage der Kalibrationspunkte zurück. Zudem war bei der Eichung der HTZ oberhalb einer Generatorleistung von etwa 75 % keine verlässliche Bestimmung der Temperatur mehr möglich. Eine geringfügige Abgasung des Glaskohlenstoffs führt bei Temperaturen von mehr als 1.800 °C zu Ablagerungen auf dem inneren Zellenglas und damit zu einer Reduzierung der emittierten Strahlung des Sigradurstabes an der Aufnahmestelle für das Pyrometer, dem Lichtleiter, wodurch eine niedrigere Strahlungstemperatur des Sigradur-Kohlenstoffs vortäuscht wurde.

5.4 Ermittlung der Aufschlusstemperatur für biogenen Opal

Zur Ermittlung derjenigen Temperatur in der Probenkammer der HTZ, bei der alle Silizium-Sauerstoff-Bindungen zerstört werden und zudem reproduzierbare Isotopenwerte gemessen werden konnten, wurde der Laborstandard jeweils mehrfach bei unterschiedlichen Probenkammertemperaturen aufgeschlossen (vgl. Abb. 12). Der amorphe Opal entspricht chemisch dem kristallinen Quarz. Da aufgrund der Schmelztemperatur des Quarzes von ca. 1710 °C eine vollständige Umsetzung des Opals bei ca. 1.700 °C zu erwarten war (FALBE & REGLITZ 1993), wurde die Aufschlusstemperatur im Bereich zwischen ca. 1.450 °C (55 % Generatorleistung) und ca. 1.950 °C (etwa 90 % Generatorleistung) variiert.

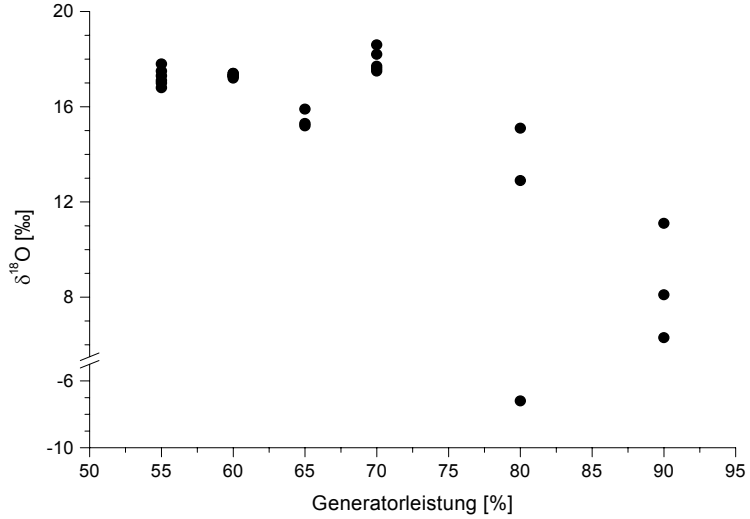


Abb. 12: Sauerstoffisotopenwerte des Laborstandards (Kieselgur) in Abhängigkeit von der Generatorleistung, i.e. der Aufschlusstemperatur die Ordinate ist im Bereich -5 bis 5 ‰ unterbrochen

Temperaturen oberhalb einer Generatorleistung von ca. 1.800 °C, d.h. 75 % der maximalen Leistung erwiesen sich bei der Reduktion der Silizium-Sauerstoff-Verbindungen in der HTZ

sowohl für den Aufschluss des Laborstandards als auch für den des kristallinen Quarzes als zu hoch. Bei diesen Temperaturen war nicht nur eine sehr große Streuung der Isotopenverhältniswerte zu beobachten, sondern das Isotopenniveau fiel aus noch ungeklärten Gründen drastisch ab. Zudem erfolgte die Zersetzungsreaktion bei diesen Temperaturen derart heftig, dass Teile des Probengemisches aus der Bohrung der Probenkammer spritzten und damit nicht umgesetzt werden konnten. Das Verwenden eines Deckels, der der Probenkammer locker aufsitzt, konnte dies verhindern, führte jedoch ebenfalls nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

Bei Temperaturen zwischen ca. 1.400 °C und 1.700 °C lieferten die Versuche dagegen sehr gut reproduzierbare δ^{18}O-Werte, wobei das optimal reproduzierbare Ergebnis (1 s = 0,10; n = 5) bei einer Temperatur von ca. 1.530 °C, entsprechend 60 % Generatorleistung, erzielt wurde. Dies ist deutlich in der Abbildung 12 erkennbar, da die aufgeführten Wiederholungen (schwarze Kreise) bei 60 % Generatorleistung nahezu identische δ^{18}O-Werte liefern. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde eine Temperatur von ca. 1.530 °C als Standard-Aufschlusstemperatur für biogenen Opal festgelegt.

5.5 Quantitative Überführung des Sauerstoffs biogenen Opals in Kohlenstoffmonoxid

Die Erzeugung verlässlicher Sauerstoffisotopenverhältniswerte verlangt eine quantitative Umsetzung des Feststoffes (biogener Opal) in Kohlenstoffmonoxid (CO). Dabei muss die Gasmenge des bei der Zersetzung des Opals freigesetzten CO in einem geschlossenen System wie der HTZ linear abhängig von der Einwaage der Probe sein, da gemäß der allgemeinen Gasgleichung der Gasdruck bei konstantem Volumen und konstanter Temperatur linear mit der Gasmenge verknüpft ist. Folglich muss eine Verdoppelung der Einwaage unter Berücksichtigung der Standard-Aufschlusstemperatur von ca. 1.530 °C eine Verdoppelung des Gasdruckes in der HTZ zur Folge haben. Die in der HTZ bei Einwaagen zwischen 500 und 2.000 µg biogenen Opals und einer Aufschlusstemperatur von ca. 1.530 °C erzielten Drücke bestätigen diesen Zusammenhang (vgl. Abb. 13).

Zur weiteren Absicherung der quantitativen Umsetzung wurden die Verbrennungsrückstände aus der Probenkammer der HTZ entnommen und mittels Heißextraktion im Heliumgasstrom mit anschließender Infrarot-Spektroskopie auf ihren Sauerstoffgehalt hin geprüft. Hierbei ergab sich, dass die Verbrennungsrückstände sowohl biogener als auch mineralischer Probenmaterialien keine Spuren von Sauerstoff mehr enthalten.

Die Gaszusammensetzung der gewonnenen Proben und damit die Frage nach möglicherweise entstandenem CO_2 wurde anhand von massenspektrometrischen Massendurchläufen (Massenscans) verschiedener Gasproben überprüft. Diese zeigten für alle umgesetzten

Feststoffe ein deutliches Signal der Massen 28 und 30 entsprechend CO, während für die Massen 44 und 45 (CO_2) lediglich Signale unter $1{,}3 \cdot 10^{-10}$, und somit weniger als 2 % des CO-Signals, detektiert werden konnten.

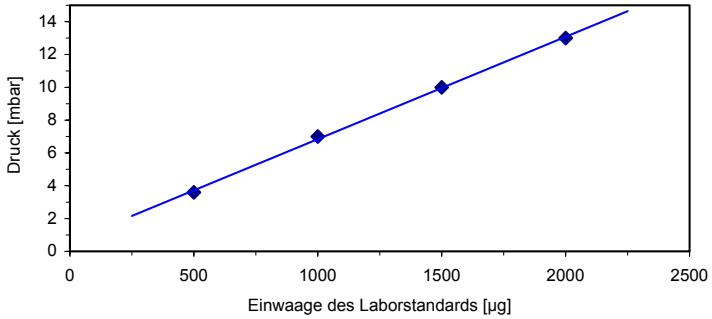


Abb. 13: Kohlenstoffmonoxidausbeuten in der HTZ bei Einwaagen von 500 bis 2.000 µg biogenen Opals (Aufschlusstemperatur: ca. 1.530°C)

5.6 Probenvorbehandlung vor dem Aufschluss des biogenen Opals

Die amorphe Struktur des biogenen Opals erlaubt die leichte An- und Einlagerung von Wassermolekülen sowie sauerstoffhaltiger Molekülgruppen an die Valven der Diatomeen. Vor allem für die äußeren Schalenbereiche der Valven ist ein Sauerstoffisotopenaustausch zwischen den angelagerten Molekülen bzw. Molekülgruppen und dem biogenen Opal bei der Zersetzung zu CO_2 oder CO aufgrund der benötigten hohen Reaktionstemperatur nicht auszuschließen. Die Entfernung sämtlicher sauerstoffhaltiger Komponenten stellt bei den klassischen chemischen Aufschlussverfahren ein präparatives Grundproblem dar (KAMATANI 1971, CLAYTON et al. 1972, KNAUTH & EPSTEIN 1982), das mit der im Rahmen dieser Arbeit etablierten Hochtemperatur-Aufschlussmethode gelöst werden konnte.

Der mögliche Einfluss sauerstoffhaltiger, an den biogenen Opal angelagerter Stoffe auf den δ^{18}O-Wert der Proben wurde im Rahmen der Methodenentwicklung durch unterschiedlich starke thermische Vorbehandlungen mehrerer Testmaterialien vor dem eigentlichen Aufschluss des biogenen Opals untersucht. Hierfür standen der Laborstandard (Kieselgur) und frische Valven der Diatomeenart *Fragialria crotonensis* aus einer Laborkultur zur Verfügung. Zudem wurden mögliche Auswirkungen relativ langer Verweilzeiten frischer Diatomeenvalven in entionisiertem Wasser und die dadurch möglicherweise einsetzende Lösung bzw. Anlösung der Valven untersucht, da eine mit der Lösung einhergehende Isotopenfraktionierung während der Lagerung der Proben in entionisiertem Wasser nicht auszuschließen ist. Diese Versuche wurden mit frischen Diatomeenvalven der ebenfalls aus einer Laborkultur stammenden Art *Cyclotella meneghiniana* durchgeführt.

Thermische Vorbehandlung:

Zur Entfernung der Restfeuchte wurden lufttrockene Proben in die Probenkammer der HTZ eingebracht und über 10 Minuten bis zur Druckstabilität bei $<10^{-3}$ mbar evakuiert. Durch Aufschlüsse ohne thermische Vorbehandlung sowie Aufschlüsse nach einer Vorbehandlung bei 10, 20, 28 und 32 % der maximalen Transformatorleistung (entsprechend Temperaturen von ca. 500, 800, 980 und 1.030 °C) wurde die Wirkung des Aufheizvorgangs auf die Sauerstoffisotopenverhältniswerte der Testmaterialien überprüft. Das im Zuge der jeweiligen Vorbehandlung entstehende Gas (Anstieg des Druckes bis auf ca. $8*10^{-2}$ mbar) deutet auf die Verdampfung bzw. Zersetzung relativ rasch pyrolysierbarer Bestandteile der Probe wie z.B. Wasser, OH-Gruppen, Reste organischer Substanz, etc. hin. Dieses Gas wurde jeweils direkt bis zur Druckstabilität bei $<10^{-3}$ mbar abgepumpt. Der Erfolg einer derartigen kurzzeitigen, ca. 4 bis 5 Minuten andauernden, thermischen Vorbehandlung zeigt sich in den Versuchsergebnissen (vgl. Abb. 14).

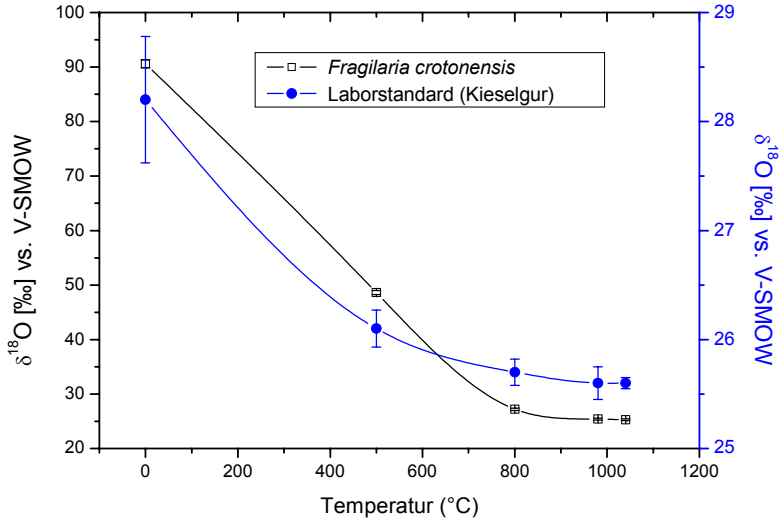


Abb. 14: δ^{18}O-Werte von *Fragilaria crotonensis* und dem Laborstandard (Kieselgur) ohne thermische Vorbehandlung sowie nach thermischer Vorbehandlung bei 500, 800, 980 und 1.030 °C vor dem Aufschluss des biogenen Opal

Im Zuge der Vorbehandlung bei einer Temperatur von ca. 800 °C kann bereits eine Stabilisierung der δ^{18}O-Werte beobachtet werden. Während die Standardabweichung der Messergebnisse ohne eine thermische Vorbehandlung noch relativ hoch ist (1 s = 0,58; n = 8), wird die Reproduzierbarkeit der Messwerte durch die Vorbehandlung bei ca. 500 °C deutlich gesteigert (1 s = 0,17; n = 6). Eine reine Vakuumtrockung ist demnach nicht aus-

reichend, um alle angelagerten Fremdbestandteile abzutrennen. Dagegen führt die Steigerung der Vorbehandlungstemperaturen auf ca. 980 °C bzw. ca. 1.030 °C nicht zu unterschiedlichen δ^{18}O-Werten. Lediglich die Reproduzierbarkeit der Messwerte erhöht sich beim Laborstandard (Kieselgur) von 1 s = 0,15 (n = 5) auf 1 s = 0,05 (n = 5).

Es ist davon auszugehen, dass bei einer Temperatur von 1.030 °C im Vakuum alle nicht zur „zentralen Schalenstruktur" gehörigen Bestandteile des biogenen Opals aufgeschlossen und entfernt werden können. Die thermische Vorkonditionierung bei 1.030 °C und der anschließende Aufschluss der opalen Gerüstsubstanz der Diatomeenvalven bei einer Temperatur von bis zu 1.530 °C ermöglicht es daher, die Sauerstoffisotopensignatur der zentralen Gerüstsubstanz der Diatomeenvalven zu bestimmen.

Lagerung in entionisiertem Wasser:

Um den Einfluss relativ langer Verweilzeiten frischer Diatomeenvalven in Wasser auf ihren δ^{18}O-Wert zu untersuchen, wurden frische Valven der aus einer Laborkultur stammenden Art *Cyclotella meneghiniana* über 2 bis 62 Tage bei Raumtemperatur in entionisiertem Wasser ($H_2O_{ention.}$) gelagert, eingefroren, gefriergetrocknet, anschließend mit dem Hochtemperatur-Aufschlussverfahren zu CO umgesetzt. Die Lagerung der Proben erfolgte in entionisiertem Wasser, da eine Anlösung der Valven vorzugsweise in reaktivem, sehr salzarmen Wasser zu erwarten war.

Wie aus der Tabelle 4 hervorgeht, wirkt sich die Lagerung frischer Diatomeenvalven in entionisiertem Wasser nicht auf ihren δ^{18}O-Wert aus. Eine Veränderung des δ^{18}O-Wertes des biogenen Opals von Süßwasserdiatomeen aufgrund mehrtägiger Lagerung in entionisiertem Wasser im Zeitraum der Separation der Valven aus Sedimenten kann somit ausgeschlossen werden.

Tab. 4: δ^{18}O-Werte von *Cyclotella meneghiniana* nach unterschiedlich langer Verweilzeit in entionisiertem Wasser; der δ^{18}O-Wert des Wassers betrug -7,6 ‰ vs. V-SMOW

Verweilzeit in $H_2O_{ention.}$	$\delta^{18}O_{SiO2}$ [‰] vs. V-SMOW	n
frisches Material*	26,3 ± 0,2	5
7 Tage	26,2 ± 0,2	4
14 Tage	26,3 ± 0,1	3
28 Tage	26,1 ± 0,2	3
62 Tage	26,3 ± 0,3	4

* *Cyclotella meneghiniana* Rohwert

5.7 Reproduzierbarkeit der mit der HTZ gewonnenen Messgasproben

Eine ausreichend gute Reproduzierbarkeit der Isotopenverhältniswerte ist neben der fraktionierungsfreien Überführung des Sauerstoffs von biogenem Opal in Kohlenstoffmonoxid das entscheidende Kriterium für die Qualität des Hochtemperatur-Aufschlussverfahrens.

Um die Reproduzierbarkeit der mit der HTZ gewonnenen Ergebnisse zu überprüfen, wurden insgesamt zehn Versuchsserien unter den in den Kapiteln 5.5 bis 5.7 erläuterten standardisierten Bedingungen durchgeführt, von denen acht in der Tabelle 5 dargestellt werden. Jeweils fünf Proben des Laborstandards (Kieselgur) wurden über zwei Schritte bei 800 und 1.030 °C vorkonditioniert und der biogene Opal bei einer Temperatur von 1.530 °C zu Kohlenstoffmonoxid und Siliziumkarbid (Feststoff) umgesetzt. Die anschließend mittels IRMS ermittelten δ^{18}O-Werte der einzelnen Versuchstage weisen geringe bis sehr geringe Standardabweichungen auf, die zudem deutlich unter der Variationsbreite der verschiedenen Fluorinierungsmethoden bleiben, für die Standardabweichungen zwischen 0,16 und 0,40 ‰ angegeben werden (z.B. BRANDRISS et al. 1998, SCHMIDT et al. 2001). Allerdings ist zu beobachten, dass der erste Wert eines jeden Tages i.d.R. von den nachfolgenden Werten abweicht. Erst die Vernachlässigung des jeweils ersten Messwertes eines Tages zur Ermittelung von Mittelwert und Standardabweichung führt zu der sehr guten Reproduzierbarkeit der Sauerstoffisotopenverhältnisse (vgl. Tab. 5). Dieser Effekt ist auf die Inbetriebnahme der HTZ nach längerer Standzeit zurückzuführen, durch die es möglicherweise zu einer Beladung der inneren Oberflächen des Sigradur-Kohlenstoffs mit geringen Mengen sauerstoffhaltiger Fremdbestandteile kommt.

Tab. 5: Untersuchungsserien zur Reproduzierbarkeit der Sauerstoffisotopenverhältniswerte des Laborstandards (Kieselgur); S 1 = Standardabweichung des ersten, S 2 = Standardabweichung des zweiten Mittelwertes

Testserie	Tagesaufschluss Nr. und unkalibrierter δ^{18}O-Rohwert [‰]					**Mittelwert 1 [‰]**	**S 1 [‰]**	**Mittelwert 2 [‰]**	**S 2 [‰]**
	1.	2.	3.	4.	5.				
1	16,58	16,36	16,31	16,19	16,27	**16,34**	**0,13**	**16,28**	**0,06**
2	16,61	16,28	16,23	16,16	16,21	**16,30**	**0,16**	**16,22**	**0,04**
3	15,93	15,70	15,77	15,79	15,73	**15,78**	**0,08**	**15,75**	**0,03**
4	16,56	16,21	16,23	16,12	16,06	**16,27**	**0,17**	**16,16**	**0,07**
5	17,41	16,55	16,57	16,75	16,58	**16,77**	**0,33**	**16,61**	**0,08**
6	15,39	15,69	15,62	15,62	15,57	**15,70**	**0,10**	**15,63**	**0,04**
7	16,51	16,19	16,17	16,24	16,26	**16,27**	**0,12**	**16,22**	**0,04**
8	15,80	15,32	15,48	15,40	15,32	**15,46**	**0,18**	**15,38**	**0,07**

Die Standardabweichungen der einzelnen Messtage dokumentieren die hervorragende Reproduzierbarkeit bei der Messgaserzeugung mit dem neuen Verfahren. Es treten jedoch z.T. erhebliche Unterschiede zwischen den Mittelwerten einzelner Tage auf, die im Zeitraum der in Tabelle 5 aufgeführten Versuchsreihen 1,23 ‰ betragen. Diese Unterschiede macht eine Kalibrierung der mit Hilfe der HTZ gewonnenen Messgasproben gegen einen geeichten Laborstandard bzw. einen internationalen Standard unerlässlich. Dies umso mehr, als Isotopenverhältniswerte aus Vergleichsgründen mit den Ergebnissen anderer Labors nur auf der Grundlage internationaler Standards sinnvoll sind.

5.8 Eichung eines Laborstandards gegen den internationalen Standard NBS28

Um die mittels HTZ und anschließender IRMS produzierten Sauerstoffisotopenwerte mit den Ergebnissen anderer Verfahren vergleichen zu können, muss eine Kalibrierung der erzeugten Messgasproben gegen einen Standard (gereinigtes Kieselgur, Merk) erfolgen. Da derzeit kein internationaler biogener Opal-Standard zur Verfügung steht, wurde für die erforderliche Kalibrierung der minerogene Standard „NBS28“ (Quarz, National Bureau of Standards, USA; Bezugsquelle: IAEA, Wien) eingesetzt, der i.d.R. als Referenzmaterial für Sauerstoffisotopenwerte verwendet wird (BRANDRISS et al. 1998, RIETTI-SHATI et al. 1998, SCHMIDT et al. 2001).

Die Kalibrierung eines gereinigten Kieselgurs, der als Laborstandard verwendet werden soll, erfolgte an sieben Messtagen durch mehrfachen Aufschluss von 1,4 bis 1,5 mg des Kieselgurs sowie anschließenden Aufschlüssen von 1,3 bis 1,4 mg des Quarzes (NBS28) in der HTZ (vgl. Tab 6).

Tab. 6: Kalibrierung des Laborstandards (Kieselgur) gegen NBS28 (Quarz); Zu beachten sind die guten bis sehr guten Reproduzierbarkeiten beider Materialien an unterschiedlichen Messtagen. Die relevanten $\delta^{18}O$-Werte des Laborstandards (25,6 ‰ ±0,17 ‰ V-SMOW) sind der vorletzten Spalte zu entnehmen

Aufschluss-datum	**NBS28**			V-SMOW-Korrektur	**Laborstandard**			
	Rohwert $\delta^{18}O$ [‰]*	n	**Sollwert** $\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	[‰]	**Rohwert** $\delta^{18}O$ [‰]	n	**korrigierter $\delta^{18}O_{SiO2}$ Wert vs. V-SMOW** [‰]*	n
29.11.01	1,1 ± 0,2	4	9,6	8,5	17,1 ± 0,2	4	**25,6 ± 0,2**	4
30.11.01	0,7 ± 0,3	3	9,6	8,9	16,5 ± 0,3	3	**25,4 ± 0,3**	3
06.12.01	0,9 ± 0,3	3	9,6	8,7	17,0 ± 0,2	5	**25,7 ± 0,2**	5
07.12.01	0,3 ± 0,1	4	9,6	9,3	16,4 ± 0,2	5	**25,7 ± 0,2**	5
17.01.02	2,0 ± 0,2	4	9,6	7,6	17,8 ± 0,2	4	**25,4 ± 0,2**	4
18.01.02	1,4 ± 0,3	3	9,6	8,2	17,3 ± 0,1	4	**25,5 ± 0,1**	4

* Bei drei und weniger Wiederholungen wird die maximale Abweichung vom Mittelwert angegeben, bei vier und mehr Wiederholungen die Standardabweichung

Die Bestimmung des $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisses der Gasproben erfolgte im Anschluss mittels IRMS. Der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Mittelwert des Quarzes, der als Bezugsgröße für die Kalibrierung des Laborstandards dient, zeigt über den Zeitraum von einem Monat eine Schwankungsbreite von 1,7 ‰. Eine vergleichbare Variation besitzt auch der Laborstandard, der gegenüber dem Quarz eine geringfügig bessere Reproduzierbarkeit besitzt. Die durchgeführte Kalibrierung des Laborstandards gegen NBS28 belegt die ausgezeichnete Reproduzierbarkeit des Laborstandards, da die erzielten Standardabweichungen unterhalb denjenigen der bisher gebräuchlichen Fluorinierungsmethoden liegen. So wurden bei den bisher durchgeführten Studien bei der Reproduktion der Sauerstoffisotopenverhältniswerte von biogenem Opal Standardabweichungen zwischen 0,17 und 0,40 ‰ erreicht (z.B. JUILLET-L & LABEYRIE 1987, SHEMESH et al. 1992, SCHMIDT et al. 1997, SHEMESH et al. 2002). Im Rahmen der Methodenentwicklung der hier vorliegenden Arbeit konnte für die Sauerstoffisotopenzusammensetzung des Laborstandards ein $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert von 25,6 ‰ ±0,14 ‰ vs. V-SMOW ermittelt werden (n = 27).

5.9 Abgleich mit Ergebnissen der Fluorinierungsmethode

In einem weiteren Schritt sollten die mit dem neuen Aufschlussverfahren in der HTZ erzielten Ergebnisse mit Sauerstoffisotopenwerten biogenen Opals, die mit Hilfe eines „klassischen" Verfahrens gewonnen wurden, verglichen werden. Hierfür stellte Herr Dr. R. Botz (Universität Kiel, Geologisch-Paläontologisches Institut) Material aus einem Sedimentkern aus der Weddell See (antarktischer Südatlantik) mit einem Alter von ca. 4 Ma zur Verfügung. Bei diesem Material handelt es sich um Valven der Diatomeenart *Ethmodiscus rex*, deren Sauerstoffisotopenverhältnis mit dem Verfahren der schrittweisen Fluorinierung in der Arbeitsgruppe von Herrn Dr. Botz bestimmt worden war. Der publizierte $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert für *Ethmodiscus rex* liegt bei 46,8 ‰ ±0,4 ‰ (maximale Abweichung vom Mittelwert) vs. V-SMOW (SCHMIDT et al. 1997, SCHMIDT et al. 2001).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde an mehreren Tagen jeweils mehrfach 1,4 bis 1,5 mg der Valven von *Ethmodiscus rex* nach mehreren Aufschlüssen des Laborstandards in der HTZ aufgeschlossen. Anschließend erfolgte die massenspektrometrische Bestimmung der $\delta^{18}O$-Werte. Die in der Abbildung 15 zusammengestellten Ergebnisse von mehreren Messtagen zeigen eine gute Reproduzierbarkeit aller drei Testmaterialien. Der gegen den Laborstandrat (Kieselgur) kalibrierte $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert für *Ethmodiscus rex* beläuft sich bei Aufschlüssen in der HTZ auf 46,7 ‰ ±0,2 ‰ (maximale Abweichung vom Mittelwert) vs. V-SMOW (n = 13). Damit liefert das neue Aufschlussverfahren einen nahezu identischen Wert zu dem von SCHMIDT et al. (1997 und 2001) publizierten $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert.

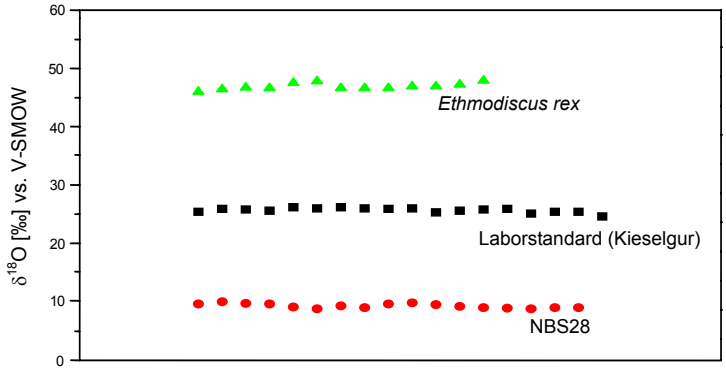


Abb. 15: Vergleich der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte von *Ethmodiscus rex* mit Messwerten des Laborstandards (Kieselgur) und des NBS28 Standards (Quarz) nach der Messgaserzeugung mit der HTZ; Fehlerbalken zur Charakterisierung der Standardabweichung sind aufgrund ihrer geringen Größe nicht darstellbar

Auch bei einem Isotopenabstand von 37,1 ‰ (≈ 46,7 ‰ bis 9,6 ‰ zwischen *Ethmodiskus rex* und NBS28) zeigt das neue Aufschlussverfahren seine Verlässlichkeit und liefert zugleich einen deutlich geringeren Standardfehler als das Verfahren der schrittweisen Fluorinierung.

6 Meteorologische Beobachtungen an der Klimastation Holzmaar

Meteorologische Größen stellen die Basis für die Übertragung von Klimasignalen in ein Klimaarchiv dar. Die Globalstrahlung und die eng mit diesem Parameter gekoppelte Lufttemperatur stellen dabei die Steuergrößen für die Übertragung von klimatischen Informationen dar. Diese Parameter sind daher die wichtigsten, im Rahmen dieser Arbeit aufgezeichneten Größen. Zur Aufzeichnung wurde eine zu Beginn der Prozessstudie auf einer Boje im Pelagial nahe der Seemitte installierte automatische Wetterstation genutzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit Hilfe der „Klimastation Holzmaar“ die meteorologischen Größen Globalstrahlung, Lufttemperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit in einem dreißigminütigen Aufzeichnungsintervall gemessen und aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen werden im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

6.1 Globalstrahlung

Seen sind offene Systeme, die durch einen ständigen Durchfluss von Energie angetrieben werden. Primäre Energiequelle dieses Antriebes ist die Globalstrahlung, die sich aus der gesamten auf eine horizontale Fläche einfallenden kurzwelligen Himmelsstrahlung, d.h. der aus gestreutem und reflektiertem Sonnenlicht bestehenden Summe direkter solarer Strahlung und diffuser Himmelsstrahlung, zusammensetzt. Die auf die Oberfläche des Sees auftreffende Globalstrahlung ist die Steuergröße für alle im See ablaufenden ökologischen Prozesse (SCHWOERBEL 1993).

Im Untersuchungszeitraum variierte die mittlere tägliche Einstrahlung um Werte von ca. 0,3 kWh/m^2/d in den Wintermonaten und Werten über 7,0 kWh/m^2/d in den Sommermonaten (vgl. Abb. 16).

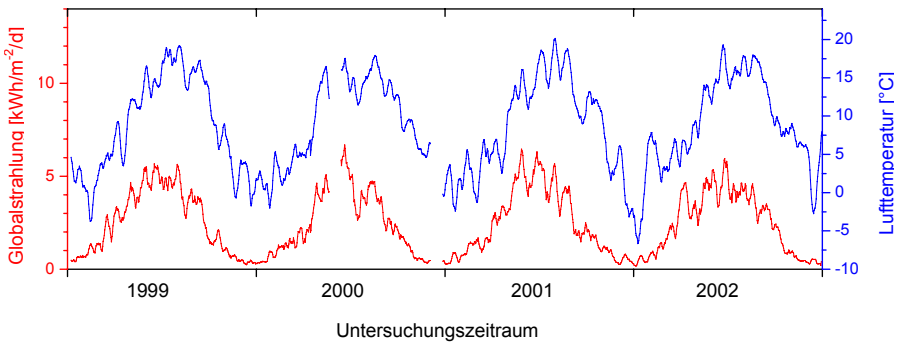


Abb. 16: Zehntägige gleitende **Tagesmittelwerte** von Globalstrahlung (kWh/m^2/d) und Lufttemperatur (°C) an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes; die Lücken in den Graphen markieren die Zeiträume der Datenverluste (vgl. Kap. 4.2)

Der niedrigste, während des Untersuchungszeitraumes aufgezeichnete Tagesmittelwert der Globalstrahlung beträgt 0,10 kWh/m^2/d und wurde am 01.01.2002 gemessen. Maximale Werte traten im Juni 2001 auf, wobei mit 7,77 kWh/m^2/d am 17.06.2001 der höchste Tagesmittelwert aufgezeichnet wurde. Auffällige, z.T. starke Schwankungen der mittleren täglichen Einstrahlung in den Sommermonaten sind auf die abschattende Wirkung durchziehender Wolkenfronten zurückzuführen.

Insgesamt zeigt die Globalstrahlung einen ausgeprägten jahreszeitlichen Verlauf. Die aufgezeichnete mittlere jährliche Strahlungssumme der Jahre 1999 bis 2002 beträgt durchschnittlich 910 kWh/m^2/a. Dies ist ein um ca. 10 % niedrigerer Wert als die an der Klimastation Trier aufgezeichnete mittlere jährliche Strahlungssumme von 1.004 kWh/m^2/a.

6.2 Lufttemperatur

Die eng an die Globalstrahlung gekoppelte Lufttemperatur variierte im Untersuchungszeitraum zwischen Tagesminima um -2 °C von Ende Dezember bis Mitte Februar und Maximalwerten um 20 °C in den Monaten Juni und Juli (vgl. Abb. 16). Mit einer Tagesmitteltemperatur von -12,3 °C war der 05.01.2002 der kälteste, der 18.06.2002 mit 23,8 °C der heißeste Tag. Der ausgeprägte jahreszeitliche Verlauf der Tagesmitteltemperatur folgt dem der Globalstrahlung, ist jedoch durch eine geringere Varianz der täglichen Werte geprägt. Ein linearer Korrelationskoeffizient von r = 0,88 verdeutlicht die enge Kopplung der Tagesmittelwerte der Lufttemperatur an die Globalstrahlung. Eine auffällig lange Periode sogenannter Eistage mit Tagesmaxima unter 0 °C stellte sich vom 28.12.2001 bis zum 12.01.2002 ein. Insgesamt sind die Winter aufgrund des überwiegend marinen Einflusses mit Winden überwiegend aus westlichen Richtungen jedoch mild. Die Sommer sind warm, heiße Tage mit Temperaturmaxima von mindestens 30 °C fehlten während des gesamten Untersuchungszeitraumes aufgrund der kühlenden Wasseroberfläche 1 m unter dem Temperatursensor völlig. Mit -18,3 °C wurde am 02.01.2002 um 7.30 Uhr (MEZ) die niedrigste Temperatur gemessen; der Maximalwert wurde mit 28,3 °C am 18.07.1999 um 15.30 Uhr (MEZ) ermittelt. Einen Überblick über die Monatsmitteltemperaturen liefert die Tabelle 7.

Tab. 7: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur [°C] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
1999	2,3	-0,3	4,7	7,9	12,6	14,2	17,9	16,0	15,3	8,1	3,0	1,6
2000	0,9	2,8	4,7	8,3	14,0	15,2	13,8	16,3	14,6	9,2	4,5	1,9
2001	1,0	2,3	4,4	5,9	13,6	13,6	17,2	16,8	10,6	11,8	3,6	-0,2
2002	-0,1	4,4	4,5	7,3	12,9	16,2	16,0	16,7	11,9	8,3	6,6	2,3

6.3 Niederschlag

Der Niederschlag ist die primäre Wasserquelle des Holzmaares und seines gesamten Einzugsgebietes und stellt daher vor allem für die Untersuchungen der Sauerstoffisotopenverhältnisse eine wichtige Basisgröße dar. Die Tagessummen des Niederschlages folgen anders als Globalstrahlung und Temperatur keinen ausgeprägten Jahresgang (vgl. Abb. 17).

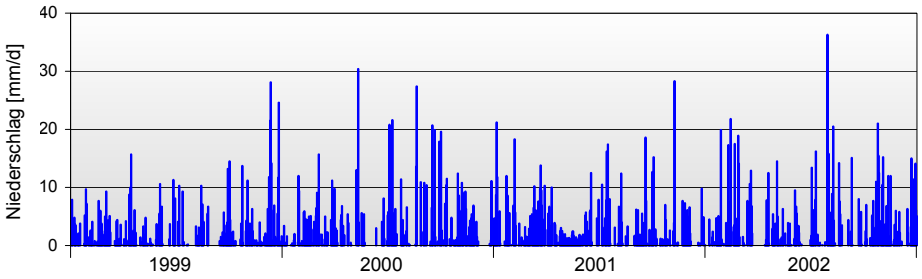


Abb. 17: Tagesmittelwerte des Niederschlages [mm/d] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes

Starkregenereignisse mit mehr als 15 mm/d konnten vor allem in den Sommermonaten festgestellt werden, jedoch lässt sich ein ausgeprägtes Sommermaximum aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraumes nicht erkennen (vgl. Abb. 17). Mit einer Menge von 36,3 mm/d wurde am 30.07.2002 die größte Tagesmenge des Niederschlages aufgezeichnet. Längere Niederschlagsperioden traten vor allem in den Wintermonaten, längere Trockenperioden insbesondere in den Sommermonaten des mit insgesamt 664 mm sehr trockenen Jahres 1999 auf. Auch die Monate Mai und Juni der Jahre 2000 und 2002 waren relativ trocken. Einen Überblick über die Monatssummen des Niederschlages liefert die Tabelle 8.

Tab. 8: Monatssummen des Niederschlages [mm/m] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes (Juni und Dezember 2000 - Datenverluste über jeweils 2 Wochen)

	Jan.	Feb.	März	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
1999	57,0	45,3	54,5	58,4	20,5	59,2	28,7	48,5	41,4	62,0	36,0	152,7
2000	32,9	63,9	75,0	40,8	74,5	-	111,0	64,1	107,9	82,6	99,5	-
2001	100,9	54,0	123,6	58,8	41,8	63,9	83,0	43,0	73,3	51,8	75,2	32,3
2002	51,9	141,9	48,8	40,7	45,8	34,4	87,8	92,6	37,3	111,0	90,7	78,5

6.4 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Schichtungsverhältnisse im Wasserkörper eines Sees. Indirekt werden zudem die Verdunstung und die oberflächennahe $\delta^{18}O_{H2O}$-Verteilung von der Windgeschwindigkeit beeinflusst. Durch die an der Wasseroberfläche erzeugte Reibung dient der Wind als Motor bei der Verfrachtung des im Frühjahr erwärmten Oberflächenwassers in die Tiefe, wobei die Verfrachtung des Oberflächenwassers mit zunehmender Temperaturamplitude zwischen dem warmen Oberflächenwasser und dem relativ kalten Tiefenwasser zu Beginn der Sommerstagnation abnimmt. Dagegen begünstigen starke Winde, wie z.B. Herbststürme, die Abkühlung der oberflächennahen Wasserschichten und somit das Einsetzen der Herbstzirkulation (SCHWOERBEL 1993).

Die am Holzmaar im Untersuchungszeitraum aufgezeichneten Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit sind durch einen sehr unruhigen Verlauf gekennzeichnet. Der am häufigsten gemessene Wert liegt bei 1,1 m/s, die mittlere Windgeschwindigkeit bei 1,8 m/s und der Median bei 1,5 m/s (vgl. Abb. 18).

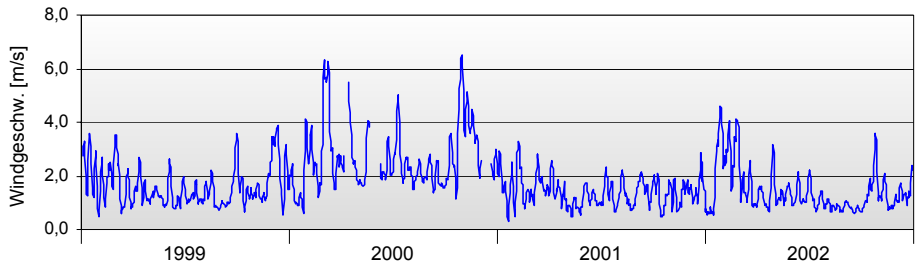


Abb. 18: Mittelwert der Windgeschwindigkeit [m/s] an der Klimastation Holzmaar während des Untersuchungszeitraumes (fünftägiger gleitender Mittelwert)

Im Untersuchungszeitraum waren Herbst und Winter die Jahreszeiten mit hohen Windgeschwindigkeiten und Spitzenwerten von über 6 m/s. Dagegen fielen in den Frühjahrs- und Sommermonaten, insbesondere zwischen Mai und Juli, Perioden geringer Windgeschwindigkeit auf, in denen Werte um 2 m/s selten überschritten wurden. Gegenüber den Jahren 1999, 2001 und 2002 können im Jahr 2000 Phasen höherer Windgeschwindigkeiten festgestellt werden. Hier lag auch die mittlere Windgeschwindigkeit mit 2,7 m/s über dem vierjährigen Mittel. Im Frühjahr und Herbst 2000 wurden zudem mit mehrfach über 6,0 m/s gleichzeitig die höchsten Werte ermittelt. Kennzeichnend für den gesamten Untersuchungszeitraum sind sich direkt ablösende Perioden sehr hoher und niedriger Windgeschwindigkeiten.

7 Limnologisch-hydrochemische Untersuchungen im Wasserkörper des Holzmaares

Im Wasserkörper des Holzmaares findet gemäß den theoretischen Überlegungen die Übertragung des atmosphärischen Temperatursignals in den biogenen Opal der Diatomeenvalven statt. Daher kommt der Erfassung der saisonalen Variationen der physikalischen und chemischen Parameter im Wasserkörper des Sees eine wichtige Bedeutung für die Fragestellungen dieser Arbeit zu.

Die Wassertemperatur und der $\delta^{18}O$-Wert des Wasserkörpers im Lebensraum der Diatomeen bilden die zentralen Faktoren für die Sauerstoffisotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal. Da artspezifische Fraktionierungsunterschiede sowie abiotische Einflüsse wie Nährstoff- oder Lichtversorgung der Diatomeenpopulation die Isotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal zusätzlich beeinflussen könnten, wurden neben der Wassertemperatur weitere limnologisch-hydrochemische Parameter untersucht. Die Ergebnisse der im Untersuchungszeitraum durchgeführten limnologisch-hydrochemischen Untersuchungen sind im Folgenden zumeist in Form von Isoliniendiagrammen dargestellt, um die räumlich-zeitlichen Veränderungen im Wasserkörper des Sees veranschaulichen zu können. In den Diagrammen stellt die Abszisse jeweils die Zeit und die Ordinate die Wassertiefe dar. Die Isolinien selbst trennen Bereiche unterschiedlicher Größen voneinander ab.

7.1 Wassertemperatur

Der größte Teil der in ein Gewässer eindringenden Strahlung wird nahe der Oberfläche absorbiert und in Wärme umgewandelt, wobei der Wärmehaushalt des Sees durch die Wärmeaufnahme aus der Luft, die Wärmeverteilung im Gewässer und die Wärmeabgabe aus dem Gewässer an die Luft bestimmt wird. Die Wassertemperatur dient als grundlegender abiotischer Faktor zur Beschreibung der zeitlichen ökologischen Veränderungen (SCHWOERBEL 1993).

Die Abbildung 19 zeigt die für den gesamten Wasserkörper des Holzmaares im Verlauf eines Jahres charakteristischen Veränderungen; in der Abbildung 20 ist der gesamte Untersuchungszeitraum dargestellt. Die Wintermonate sind von einem schwachen Temperaturgradienten zwischen Wasseroberfläche und Seegrund gekennzeichnet. Ab Mitte März setzt mit zunehmender Globalstrahlung und der einhergehenden Erwärmung des Oberflächenwassers die thermische Stratifizierung des Sees ein. Geschwindigkeit und Tiefenausdehnung der durch den Wind induzierten Verlagerung des Oberflächenwassers hängen dabei von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und vor allem von der Temperatur des

Oberflächenwassers ab. Je stärker die Temperatur des Oberflächenwassers ansteigt, desto weniger tief kann das erwärmte Wasser verfrachtet werden, da die Dichteänderung des Wassers mit steigender Temperatur rasch zunimmt (vgl. Tab. 9). Eine fortschreitende Erwärmung des Oberflächenwassers führt dabei zu einer Zunahme der Stabilität des Wasserkörpers und im Holzmaar entwickelt sich ab Mitte Mai ein thermisch mehr oder weniger homogenes Epilimnion, dessen Temperatur in den Monaten Juni bis August noch in 4 m Tiefe bis auf über 20 °C ansteigt. Die Mächtigkeit des Epilimnions wächst im Laufe des Sommers von zunächst ca. 4 auf ca. 6 bis maximal ca. 8 m an.

Tab. 9: Temperatur, Dichte und spezifisches Volumen des Wassers

Temperatur [°C]	Dichte	Spez. Volumen [l/kg]
0 (Eis)	0,91860	1,08861
0 (Wasser)	0,99987	1,00013
3,98	1,00000	1,00000
5	0,99999	1,00001
10	0,99973	1,00027
15	0,99913	1,00087
20	0,99823	1,00177

Währen der Sommermonate findet im Wasserkörper des Sees über das als thermische Barriere fungierende Metalimnion mit steilem Temperaturgradienten hinaus nur ein geringer Wärmetransport in größere Tiefe statt, so dass die Temperatur des hypolimnischen Tiefenwassers bis in den Herbst bei unter 5 °C etwa konstant bleibt. Erst mit fortschreitender Abkühlung des Oberflächenwassers und der damit einhergehenden Erhöhung der Dichte des Wassers kann der im Herbst i.d.R. stärker werdende Wind den Wasserkörper wieder durchmischen, was ab Anfang November zu einer Vollzirkulation führt. Die sich während des Sommers aufgebaute thermische Schichtung geht dann verloren und der vollständig durchmischte Wasserkörper ist physikalisch und chemisch wieder nahezu konstant.

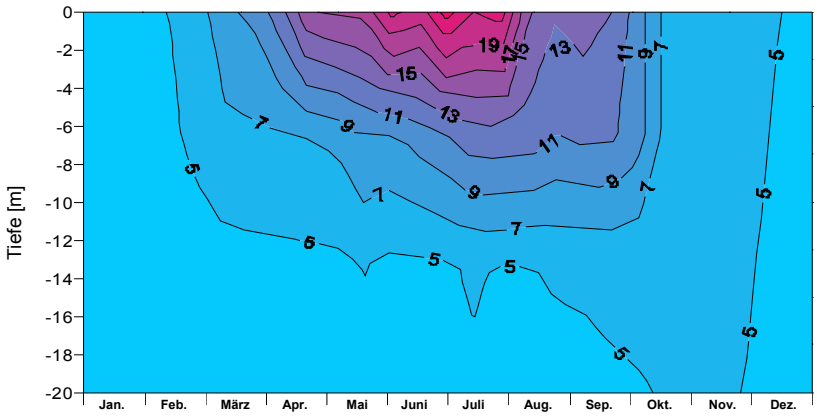


Abb. 19: Wassertemperatur [°C] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares 2001

Der charakteristische Jahresgang der Wassertemperatur war während des gesamten Untersuchungszeitraumes nahezu identisch, wobei sich im Epilimnion des Sees im Jahre 2002 mit 18,8 °C die kleinste und im Jahre 2001 mit 19,9 °C die größte Temperaturamplitude einstellte (vgl. Abb. 20).

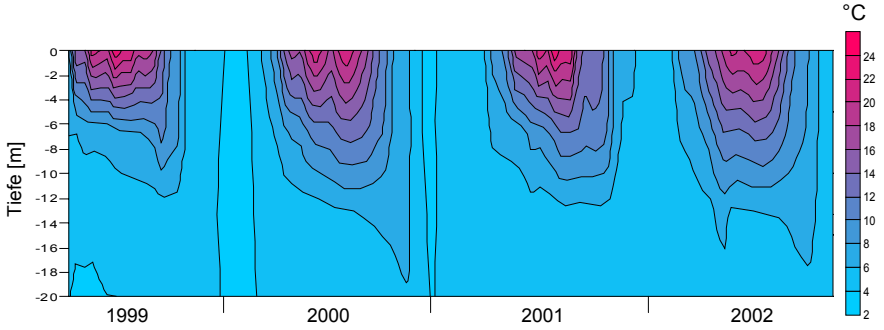


Abb. 20: Wassertemperatur [°C] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes

Entgegen den einzelnen sehr ähnlichen intraannuellen Temperaturverläufen im Wasserkörper des Holzmaares war die winterliche Eisbedeckung im Untersuchungszeitraum unterschiedlich lang. Während der See in den Wintern 1999/2000 und 2000/2001 nur über einen kurzen Zeittraum mit einer Eisdecke von wenigen Zentimetern bedeckt war, wuchs die Eisdecke im Winter 2001/2002 bis auf eine für Personen tragfähige Mächtigkeit von 12 bis 15 Zentimetern an (mündl. Mitteilung D. KARGER 2002).
Im Februar 2000 und 2001 unterschritt die Wassertemperatur jeweils 4 °C. Dagegen konnte im Winter 2001/2002 keine Temperatur unter 4 °C gemessen werden. Als möglicher Grund hierfür kann die lange winterliche Eisbedeckung angesehen werden, die dem Wasserkörper im Winter 2001/2002 als Isolierschicht auflag.

Die Wassertemperatur des Sammetbaches variierte im Untersuchungszeitraum zwischen Werten von 4 °C im Winter und 17 °C im Sommer. Die Wassertemperatur der Quellschüttung variierte dagegen lediglich zwischen 6,8 °C und 14 °C. Zwischen Juli und Ende September eines jeden Jahres erfolgte keine Probenahme an der Quelle, da in diesem Zeitraum zunächst eine sehr geringe, später keine Quellschüttung mehr erfolgte. Seit dem Frühsommer 2001 setzte die Quellschüttung entgegen den Erwartungen zu keinem Zeitpunkt wieder ein, was auf Forstarbeiten am nordöstlichen Tuffring zurückzuführen ist, bei denen der Boden im Bereich der Quelle mit schweren Traktoren verdichtet wurde. Am Ablauf des Sees wurden nahezu identische Temperaturen wie an der Wasseroberfläche der Seemitte gemessen, wenngleich die sommerlichen Maxima am Ablauf i.d.R. um ca. 0,5 °C höher lagen. Kennzeichnend für alle Messstellen ist ein deutlicher Jahresgang der Wassertemperatur ohne erkennbare Verzögerungen zum Jahresgang in der Seemitte.

7.2 Sichttiefe nach SECCHI

Die Sichttiefe nach SECCHI ist ein leicht zu bestimmendes Maß für die Lichtverhältnisse im Wasserkörper eines Sees. Der Sichttiefe nach SECCHI entspricht etwa die Wassertiefe, in die noch 10 % der auf die Wasseroberfläche auftreffenden Strahlung eindringt (LAMPERT & SOMMER 1993, WETZEL 2001). Die Sichttiefe nach SECCHI dient als einfaches Hilfsmittel zur Bestimmung der Kompensationstiefe eines Gewässers, d.h. derjenigen Wassertiefe, in die noch 1 % der photosynthetisch aktiven Intensität des Lichtes gelangt, die unmittelbar unter der Wasseroberfläche vorhanden ist. Unterhalb dieser Tiefe ist keine Netto-Primärproduktion mehr möglich, da der Energiebedarf der Produzenten hier größer ist als der Zuwachs ihrer Biomasse. Die Tiefe der Kompensationsebene und damit auch die Ausdehnung der euphotischen Zone ist in Seen sowohl von der Intensität der Globalstrahlung als auch der Menge an Schwebstoffen im Wasser und folglich vom Phytoplankton selber abhängig (Eigenabschattung) und daher jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen (vgl. LAMPERT & SOMMER 1993, SCHWOERBEL 1993, WETZEL 2001).

Im Holzmaar vergrößert sich die Ausdehnung der euphotischen Zone mit der Zunahme der Globalstrahlung. Die Ausdehnung der euphotischen Zone erreicht in den Sommermonaten ihre maximale Mächtigkeit. Verschiedene Autoren geben unterschiedliche Faktoren an, um die Kompensationstiefe mit Hilfe der Sichttiefe nach SECCHI zu bestimmen. REYNOLDS (1984) und WETZEL (2001) verwenden z.B. den Faktor 1,7, LÜCKE (1998) verwendet den Faktor 2,5. Danach liegt die Kompensationstiefe im Pelagial des Holzmaares in den Sommermonaten nach REYNOLDS und WETZEL zwischen 5 und 8 m, nach LÜCKE bei 7 bis 12 m Wassertiefe (vgl. Abb. 21 und Abb. 22).
Die Sichttiefe nach SECCHI folgte im Holzmaar im Untersuchungszeitraum einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Jahresgang mit Sichttiefenmaxima in den Sommermonaten und geringen Sichttiefen in den Wintermonaten. Die generell niedrige Sichttiefe der Wintermonate widerspricht dabei der Annahme, dass die Sichttiefe in erster Linie von der Biomasse und weniger von anorganischen Einträgen in das Gewässer beeinflusst wird. Trotz geringerer Biomasseaktivität in den Wintermonaten erhöht sich die Sichttiefe zu dieser Jahreszeit nicht.
Im Holzmaar wird die Sichttiefe entscheidend von der Verteilung von *Planktothrix rubescens* (Burgunderblaualge) im Wasserkörper beeinflusst, die zzt. den größten Anteil an der Biomasse und damit an der Netto-Primärproduktion des Sees ausmacht. Da *Planktothrix rubescens* bereits ab einer Strahlungsintensität von 28 W/m^2 in ihrer Photosyntheseleistung gehemmt wird (LAMPERT & SOMMER 1993), schichtet sich dieses zur selbstständigen Bewegung im Wasserkörper befähigte Cyanobakterium bei hoher sommerlicher Strahlung in einem Tiefenbereich von ca. 4 bis 6 m ein und beschattet damit den oberen Seebereich nicht mehr, woraus die große sommerliche Sichttiefe resultiert.

Die Auswirkung der Bewegung von *Planktothrix rubescens* im Wasserkörper des Sees auf die Sichttiefe wird im Jahre 2000 besonders deutlich. In diesem Jahr folgte auf das hochsommerliche Sichttiefenmaximum mit anschließender Abnahme der Sichttiefe ein weiteres Maximum im September. Mit der schwächer werdenden Globalstrahlung stieg *Planktothrix rubescens* im Wasserkörper auf, was zu einer Abnahme der Sichttiefe führte. Auf einen erneuten starken Anstieg der Globalstrahlung Ende August, der auch zu einem zweiten Maximum der Lufttemperatur führte (vgl. Abb. 21), reagierte *Planktothrix rubescens* mit einem neuerlichen Absinken in größere Wassertiefen, woraus eine erneute Zunahme der Sichttiefe resultierte.

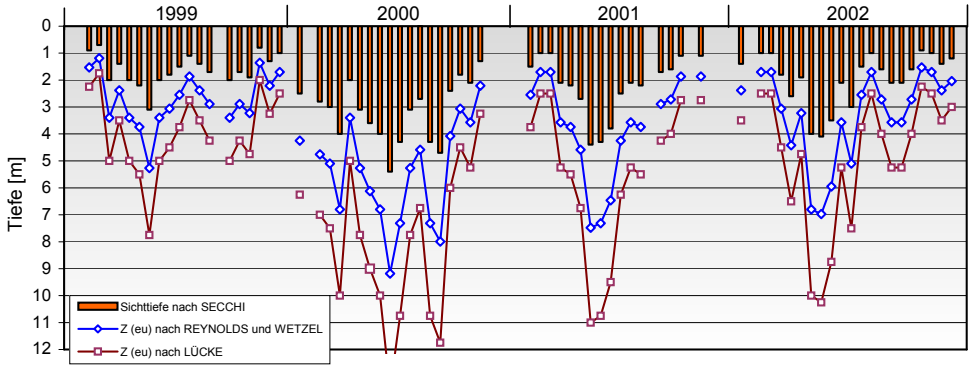


Abb. 21: Sichttiefe nach SECCHI und maximale Tiefe der euphotischen Zone Z(eu) im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes, berechnet nach verschiedenen Autoren

7.3 Photosynthetisch aktiver Wellenlängenbereich des Lichtes (PAR)

Das Spektrum des für die Biomasseproduktion photoautotropher Wasserpflanzen nutzbare Licht (PAR - **p**hotosynthetically **a**ctive **r**adiation) umfasst den Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm. Die Strahlungsintensität wird in Wasserkörpern in Energieeinheiten angegeben wobei $mol * m^{-2} * s^{-1}$ (ehemals Einstein) als Einheit dient. Die Photosyntheserate steigt in Gewässern im Jahresverlauf mit zunehmender Strahlungsintensität zunächst fast linear an, erreicht ein Plateau und nimmt bei weiterer Steigerung wieder ab. Dabei nimmt die licht- und temperaturabhängige Biomasseproduktion mit zunehmender Wassertiefe zunächst rasch zu, da das photosynthesehemmende ultraviolette Spektrum des Lichts in den oberen Dezimetern des Wasserkörpers absorbiert wird. Die Produktivität erreicht ihr Maximum und fällt mit zunehmender Wassertiefe wiederum ab. Zur Lichtadaptation befähigte Algen bewegen sich daher bei abnehmender Strahlung nach oben, wodurch die herbstliche Reduktion der euphotischen Zone gegenüber dem Rückgang der Globalstrahlung verzögert wird (REYNOLDS 1984, SCHWOERBEL 1993, WETZEL 2001 und Kap. 6.2).

Die im Holzmaar mit Hilfe eines Quantensensors ermittelte Kompensationstiefe weicht z.T. deutlich von derjenigen auf Grund der Sichttiefe nach REYNOLDS, WETZEL und LÜCKE berechneten ab (vgl. Abb. 22). In den strahlungsreichen Sommermonaten dehnt sich die euphotischen Zone im Pelagial des Sees bis in etwa 7 m Wassertiefe aus. Dagegen erreicht ihre Tiefenausdehnung in den strahlungsärmeren Jahreszeiten lediglich 3 bis 5 m.

Vor allem in den strahlungsreichen Sommermonaten wird die Tiefenausdehnung der Kompensationsebene die aufgrund der Sichttiefe berechnet wurde z.T. erheblich überschätzt. Ein möglicher Grund ist im Absinken von *Planktothrix rubescens* bis in Wassertiefen unter 4 m zu sehen. Die aufgrund ihrer Schwachlichtadaption in den Sommermonaten in die Tiefe abgesunkenen Cyanobakterien beschatten in dieser Jahreszeit den oberen Wasserkörper nicht, was zum sog. Klarwasserstadium beiträgt. Dagegen absorbiert *Planktothrix rubescens* in einer Wassertiefe von 4 bis 5 m große Mengen der bis dort eindringenden photosynthetisch aktiven Strahlung und beschatten zudem den tieferen Wasserkörper. Die Berechnung der Kompensationsebene aufgrund einer Lichtquantenmessung ermöglicht es daher die Tiefenausdehnung der euphotischen Zone im Holzmaar wesentlich genauer zu beschreiben.

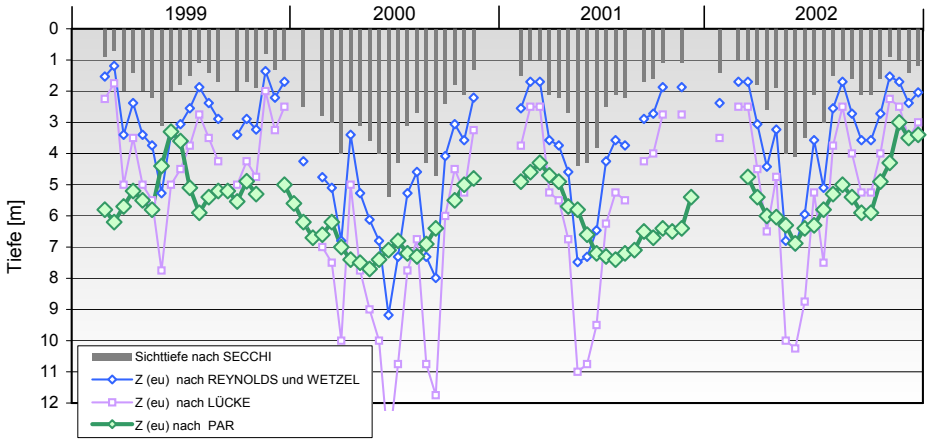


Abb. 22: Tiefe der Kompensationsebene zwischen euphotischer und aphotischer Zone nach der Messung mit einem Lichtquantensensor im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes (sowie berechnet nach verschiedenen Autoren)

7.4 pH-Wert

Der pH-Wert eines Gewässers wird wesentlich von den Puffereigenschaften des Kohlensäure-Kalziumhydrogenkarbonat-Systems und der Aktivität des Phytoplanktons bestimmt. Karbonatarme Weichwasserseen wie das Holzmaar reagieren meist schwach sauer bis neutral, erreichen jedoch bei hoher Biomasseproduktion und dem damit einhergehenden Entzug von CO_2 aufgrund der Photosynthese pH-Werte bis >9,0 (SIGG & STUMM 1994).

Wie die Abbildung 23 verdeutlicht, treten im Holzmaar im Epilimnion z.T. erhebliche Variationen des pH-Wertes auf, während im Hypolimnion außer durch die leichte Erhöhung in Folge der Vollzirkulation zumeist nur sehr geringe Veränderungen des pH-Wertes auftreten. Ausgehend von einem pH-Wert um 7,5 steigt der pH-Wert im Epilimnion in den Sommermonaten auf Werte von mehr als pH 10,0 an. Ein solcher, stark erhöhter pH-Wert lässt sich durch den biogenen Entzug des gesamten, im Wasser gelösten CO_2 infolge hoher Photosyntheseaktivität erklären.

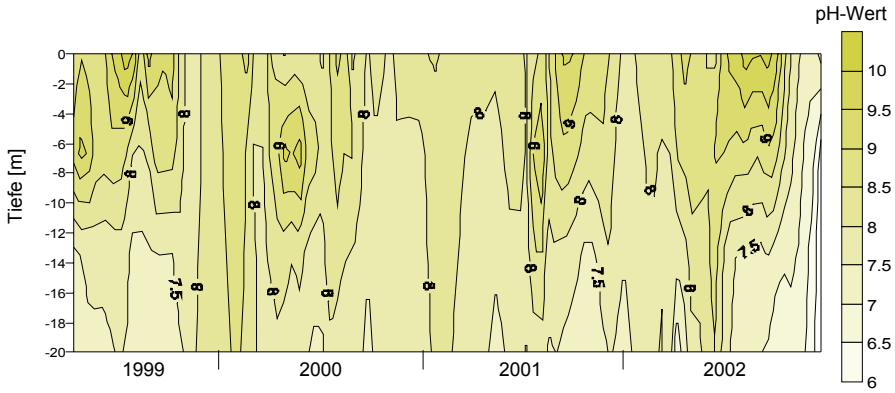


Abb. 23: pH-Wert des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes

Anders als der Jahresgang der Temperatur unterliegen die Veränderungen des pH-Wertes jedoch keinem wiederkehrenden Muster. Während in den Jahren 1999 und 2000 maximale pH-Werte vor allem in den Monaten Mai bis Juli in 4 bis 6 m Wassertiefe auftraten, kam es 2001 noch in 10 m Tiefe zu erhöhten Werten. 2002 vergrößerten sich die Tiefenausdehnung und vor allem die zeitliche Ausdehnung erhöhter pH-Werte nochmals deutlich. Diese Veränderung muss auf das massenhafte Auftreten von *Planktothrix rubescens* zurückgeführt werden. Warum sich *Planktothrix rubescens* ab dem Frühsommer 2001 mit hoher Individuendichte über einen immer ausgedehnteren Bereich des Wasserkörpers und im speziellen auch über das stark lichtdurchflutete obere Epilimnion ausbreitete, ist unklar.

Das oberflächennahe Grundwasser und der Sammetbach weisen nur geringfügige Veränderungen ihrer pH-Werte zwischen pH 7,5 und pH 8,4 auf. Die Variation des pH-Wertes im Ablauf spiegelt erneut die Veränderungen der Werte in der Seemitte wider. Die Werte reichen von pH 7,5 im Winter bis zu Maximalwerten um pH 9,0 in den Sommer- und Herbstmonaten.

7.5 Gelöster Sauerstoff

Die Konzentration des gelösten Sauerstoffs im Wasserkörper eines Sees wird durch die Sauerstoffzufuhr bei der Diffusion zwischen Atmosphäre und Gewässer, der Photosyntheseleistung heterotropher Organismen, den hypolimnischen Eintrag durch Zuflüsse, den Sauerstoffverbrauch durch Atmung, Abbau und Mineralisation organischer Stoffe und den Sauerstoffverlust an die Atmosphäre bestimmt. Die Sauerstoffkonzentration ist umso niedriger, je geringer der Eintrag von Sauerstoff und je schwächer die Stoffwechselleistung heterotropher Organismen ist. Im Epilimnion wird auch während der sommerlichen Stagnationsphase ständig Sauerstoff durch die Photosynthese nachgeliefert, wobei tagsüber Sauerstoffübersättigungen auftreten können. Im Hypolimnion können sich dagegen sauerstoffarme oder sogar anoxische Bedingungen einstellen, die vor allem durch den sauerstoffzehrenden Abbau von organischer Substanz durch aerobe Bakterien ausgelöst werden (SCHWOERBEL 1993).

Im Holzmaar differenziert sich die Konzentration des gelösten Sauerstoffs über weite Teile eines Jahres in einen Bereich stark erhöhter Sauerstoffkonzentrationen im Epilimnion und einen Bereich sehr niedriger Konzentrationen im Hypolimnion (vgl. Abb. 24). Die Löslichkeit des Sauerstoffs ist temperaturabhängig und sinkt mit steigender Wassertemperatur. Dagegen wächst der Sauerstoffbedarf aquatischer Organismen mit dem Anstieg der Wassertemperatur, und die Menge des gelösten Sauerstoffs kann zum wachstumslimitierenden Faktor werden. Beispielsweise benötigen Süßwasserfische Sauerstoffgehalte von mindestens 4 bis 5 mg/l.

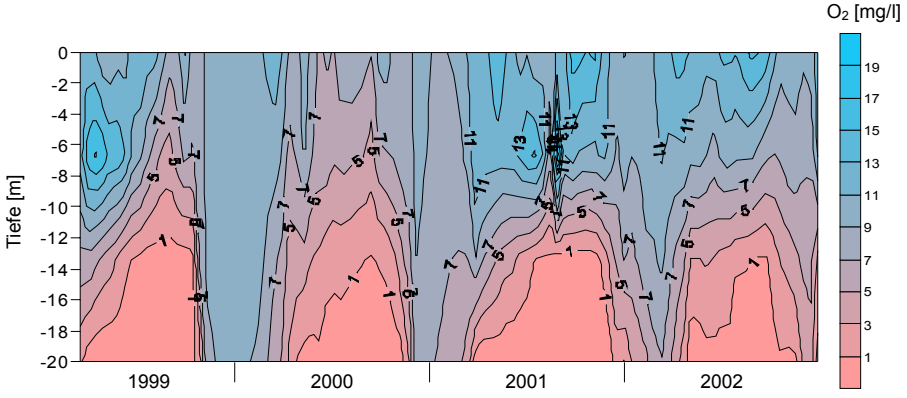


Abb. 24: Sauerstoffkonzentration [mg/l] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes

Die Sauerstoffsättigungskonzentration im Epilimnion des Holzmaares beträgt bei einer Wassertemperatur von 5 °C ca. 12,37 mg/l, bei 10 °C ca. 10,92 mg/l, bei 15 °C ca. 9,76 mg/l und bei einer Wassertemperatur von 20 °C noch ca. 8,84 mg/l. Die besonders in den

Sommern 1999 und 2001 aufgetretene Sauerstoffübersättigung wurden jeweils zwischen 11:00 und 12:00 Uhr vormittags im Epilimnion ermittelt. Maximalwerte um 23 mg/l bei einer Wassertemperatur von ca. 19,5 °C entsprechen dabei einer Übersättigung von ca. 260 %. Diese Übersättigung resultiert aus der zu dieser Tageszeit sehr hohen Photosyntheseleistung von *Planktothrix rubescens* in 6 bis 8 m Wassertiefe. Im Epilimnion des Holzmaares wird während des gesamten Jahres Sauerstoff durch die Photosynthese produziert und durch die Diffusion aus der Atmosphäre in das Gewässer nachgeliefert bzw. bei Übersättigung an die Atmosphäre abgegeben. Sauerstoffzehrende und -liefernde Prozesse gleichen sich hier in etwa aus.

Die Sauerstoffkonzentration des Hypolimnion zeigt dagegen einen starken jahreszeitlichen Verlauf. Zur Zeit der Vollzirkulation im Winter wird sauerstoffreiches Wasser aus dem Epilimnion bis in das Profundal des Sees transportiert, was die Sauerstoffkonzentration noch in 19 m Wassertiefe kurzzeitig auf bis zu 8 mg/l steigen lässt. Mit dem Aufbau der thermischen Stratifizierung in den Frühjahr- und Sommermonaten verringert sich die Nachlieferung und kommt während der Sommerstagnation völlig zum Erliegen. Durch die aerobe Veratmung und den Abbau organischer Reste durch Destruenten tritt sehr rasch ein Sauerstoffmangel auf, was im Profundal des Sees von Ende April bis Ende November zu anoxischen Bedingungen führt. In den Herbstmonaten wurden bereits in 10 m Wassertiefe Sauerstoffkonzentrationen von weniger als 0,5 mg gelöstes O_2 pro Liter Wasser ermittelt. Einen Überblick über den Sauerstoff- und den Temperaturgradienten während der thermischen Sommerstagnation gibt die Abbildung 25. Die tagsüber z.T. auftretende Sauerstoffübersättigung in 6 bis 8 m Wassertiefe bleibt in der Abbildung aufgrund des ausgeprägten sommerlichen Tagesgang der Sauerstoffkonzentration unberücksichtigt.

Das oberflächennahe Grundwasser und der Sammetbach weisen deutlich geringere Konzentrationsänderungen als der Wasserkörper des Sees auf. Die Sauerstoffkonzentration im Sammetbach folgt dabei einem ausgeprägtem Jahresgang mit ca. 6,5 mg/l im Winter und maximal 12,4 mg/l im Sommer, der den Verlauf der Wassertemperatur nachzeichnet.

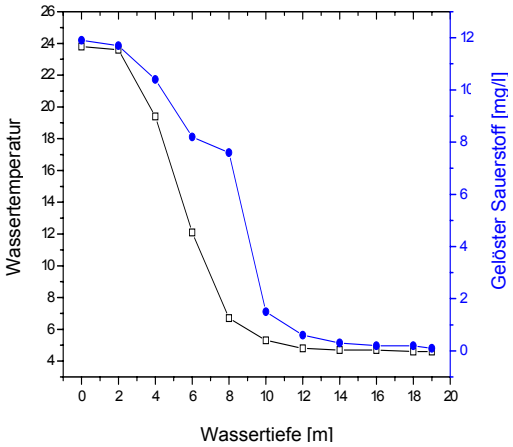


Abb. 25: Vertikaler Sauerstoff- und Temperaturgradient im Pelagial des Holzmaares während der thermischen Sommerstagnation im Jahr 2000

Die erhöhte Sauerstoffkonzentration im Sammetbach während der Sommermonate weist auf die Sauerstoffproduktion von Aufwuchsalgen, Moosen und submersen Phanerogamen in dem keinen Bach hin, die den Photosynthesesauerstoff in kleinen Fließgewässern liefern (SCHWOERBEL 1993). Die Konzentration an der Quelle schwankt zwischen 6,8 und 10,5 mg/l und lässt keinen Jahresgang erkennen. Die Sauerstoffkonzentration im Ablauf korrespondiert mit der Variation an der Seeoberfläche in der Seemitte.

7.6 Hydrochemische Charakterisierung des Holzmaares

Neben den Hauptnährelementen Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff stellen vor allem Stickstoff und Phosphor, aber auch Natrium, Kalium, Magnesium und Kalzium wichtige Makronährstoffe für solche aquatische Mikroorganismen dar, die am Anfang der lakustrinen Nahrungskette stehen. Diatomeen und Chrysophyceen (Goldalgen) benötigen zudem größere Mengen gelösten Siliziums, das von Diatomeen für ihren Schalenaufbau und von Chrysophyceen zum Aufbau von Überdauerungsstadien, sog. Zysten, benötigt wird (LAMPERT & SOMMER 1993, SCHWOERBEL 1993).

Einen Überblick über die mittlere Konzentration wichtiger Makronährstoffe im Pelagial des Holzmaares liefert die Tabelle 10. Beim Vergleich der von verschiedenen Autoren bis 1996 ermittelten Daten mit den Ergebnissen dieser Arbeit fallen die geringen Veränderungen der Werte über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren auf.

Tab. 10: Mittlere Konzentrationen der wichtigsten Makronährstoffe im Wasserkörper des Holzmaares nach SCHARF & OEHMS*, Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz** und im Untersuchungszeitraum 1999 bis 2002 (1995 und 1996 Mittelwerte aus 4 Beprobungsterminen, 1999 bis 2002 Mittelwerte aus jeweils über 17 Beprobungsterminen)

Datum / Jahr	Tiefe [m]	Na^+ mg/l	K^+ mg/l	Mg^{++} mg/l	Ca^{++} mg/l	Si mg/l	NO_3^- - N mg/l	P_{tot} µg/l
10.05.1979*	0-18	15,9	2,1	7,2	14,6			22
23.04.1982*	0-18	19,2	2,1	9,9	15,7		5,2	28
12.02.1987*	0-15	20,4	1,8	8,9	15,2	2,9	5,7	20
12.04.1989**	0-18	22,4	2,3	8,8	14,7	2,9	5,6	24
18.03.1993**	0-18	21,2	2,2	8,9	15,0	3,1	6,2	17
10.02.1994**	0-18	15,7	2,0	8,6	14,5	2,9	6,9	33
1995**	0-18	15,1	2,1	7,6	12,4	4,3	5,6	23
1996**	0-18	22,1	2,4	8,7	13,7	3,7	5,2	25
1999	0-18	22,8	2,2	8,4	14,2	3,3	5,3	
2000	0-18	17,2	1,7	6,9	11,9	1,9	5,9	
2001	0-18	17,5	2,0	7,0	12,1	2,5	5,3	
2002	0-18	20,2	2,1	7,3	13,1	2,8	4,7	

7.6.1 Gelöstes Nitrat

Die wichtigsten anorganischen Stickstofflieferanten für das Phytoplankton sind Nitrat und Ammonium, wobei das bei der Zersetzung von organischen Resten freiwerdende Ammonium erst nach vollständiger Zehrung des Nitrats die Stickstoffversorgung des Phytoplanktons übernimmt. Entsprechend der jahreszeitlichen Schwankungen der Netto-Primärproduktion variieren auch die Nitratwerte in Gewässern (SCHWOERBEL 1993).

Im Holzmaar war während des gesamten Untersuchungszeitraumes ein Jahresgang der Nitratkonzentration festzustellen (vgl. Abb. 26). Ausgehend von einer über den gesamten Wasserkörper nahezu konstanten Nitratkonzentration zwischen 25,0 und 29,0 mg/l nach der winterlichen Vollzirkulation begann der Rückgang im Epilimnion jeweils zwischen Ende April und Mitte Mai aufgrund der dann merklich einsetzenden Nitratzehrung durch das Phytoplankton. Dieser Rückgang setzte sich kontinuierlich fort und mit Werten um 9 bis 11 mg/l wurden im Epilimnion jeweils Ende September die geringsten Nitratkonzentrationen erreicht. Eine Ausnahme bildete die Vegetationsperiode 2000, in der die Nitratkonzentration des Epilimnions lediglich auf Werte um 16 mg/l zurückging.

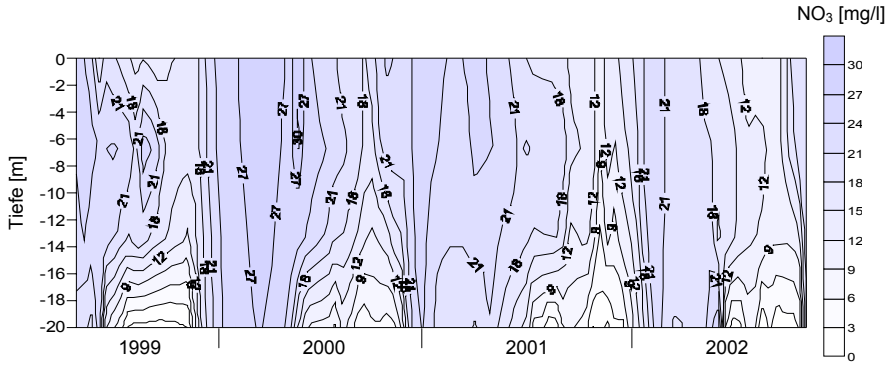


Abb. 26: Nitratkonzentration [mg/l] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes

Die Nitratkonzentration im anoxischen Hypolimnion des Sees unterschied sich deutlich von der des Epilimnions. Im Hypolimnion setzte der Konzentrationsrückgang jeweils etwas früher ein und erreichte ab Ende August im Profundal Werte unterhalb der Nachweisgrenze bei 0,05 mg/l NO_3. Erst mit einsetzender Herbstzirkulation gegen Ende November stieg die Nitratkonzentration wieder an. Das Jahr 2000 bildet auch hier eine Ausnahme, da die Nitratgehalte auch im tiefen Hypolimnion in diesem Jahr nur bis minimal 3,4 mg/l NO_3 zurückgingen. Der starke Rückgang der Nitratkonzentration im anoxischen Hypolimnion des Sees wird nicht durch die Zehrung aufgrund hoher Phytoplanktonproduktion verursacht, durch die der Konzentrationsrückgang im Epilimnion gegeben ist. Vielmehr kam es in

größerer Tiefe des Sees aufgrund eines hier herrschenden sehr geringen sommerlichen Redoxpotenzials zur Denitrifikation des NO_3 zu N_2 durch Nitrat veratmende Bakterien (STUMM & MORGAN 1981, WETZEL 2001). Die deutlich geringere Abnahme der Nitratkonzentration im gesamten Wasserkörper des Sees im Jahre 2000 kann auf die vom 19.06. bis zum 25.09.2000 stark erhöhten Nitratgehalte im Zulauf durch den Sammetbach zurückgeführt werden. Während hier in den übrigen Jahren die höchsten Konzentrationen mit 40 bis 50 mg/l NO_3 jeweils erst in den Monaten November und Dezember ermittelt wurden, betrug die Konzentration währen des gesamten Sommers 2000 zwischen 40 und 50 mg/l NO_3 (vgl. Abb. 27).

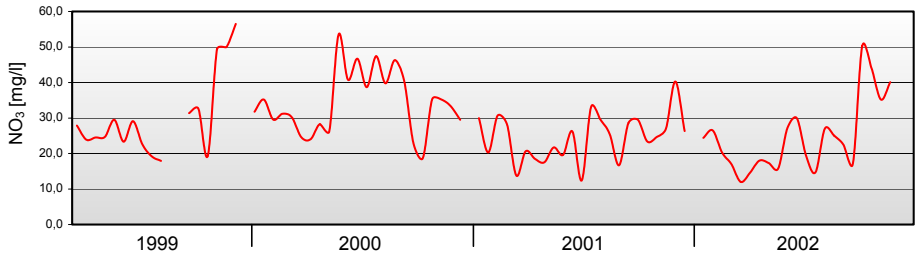


Abb. 27: Nitratkonzentration [mg/l] des Sammetbaches während des Untersuchungszeitraumes

Die Nitratkonzentration im Ablauf spiegelte die Veränderungen im oberen Wasserkörper des Sees wider. Auch die im Jahre 2000 erhöhten Werte sind im Ablauf feststellbar. Dagegen lag die Nitratkonzentration an der Quelle, bei der kein charakteristischen Jahresgang festgestellt werden konnte, mit 30 bis 40 mg/l deutlich über der des Sammetbaches, was auf eine starke Düngung der oberhalb der Quelle gelegenen ackerbaulich genutzten Fläche hindeutet.
Die unterschiedlich hohen Nitrateinträge in den See werden durch den Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der einzelnen Nitratquellen über die gesamte Untersuchungsperiode besonders deutlich (vgl. Tab. 11).

Tab. 11: Mittelwert, Standardabweichung und Stichprobenumfang der Nitratkonzentration der einzelnen Nitratquellen während des Untersuchungszeitraumes

NO_3-Quelle	arith. Mittel [mg/l]	1 s [mg/l]	n
Niederschlag	2,1	1,1	73
Sammetbach	28,4	9,8	84
Quelle	35,6	5,1	46

7.6.2 Gelöstes Silizium

Das in Gewässern gelöste Silizium dient in erster Linie als Baustoff für die Valven von Diatomeen (vgl. Kap. 2.4). Die einzige Quelle des Siliziums, das in Seen mit pH-Werten <9 als nicht dissoziierte Orthokieselsäure [$Si(OH)_4$] vorliegt, ist die Verwitterung silikatischer Minerale im Einzugsgebiet des Gewässers. Die einzige bedeutende Siliziumsenke ist die Sedimentation abgestorbener Diatomeen in das Profundal der Gewässer und deren Eintrag in das Sediment. Da der Gehalt an gelöster Kieselsäure in Seen stark mit der Entwicklung von Diatomeenpopulationen korreliert, ist die sinkende Siliziumkonzentration im Seewasser ein guter Indikator für die Vermehrung von Diatomeen (SOMMER & STABEL 1983, SCHWOERBEL 1993, LAMPERT & SOMMER 1993).

Im Holzmaar entwickelten sich die Kieselsäuregehalte im Epilimnion und im Hypolimnion voneinander abgekoppelt (vgl. Abb. 28). Im Epilimnion kam es jeweils Ende März bis Mitte April zum Absinken der Kieselsäurekonzentration, die nach kurzer Zeit wieder stieg, um dann Anfang bis Mitte Mai wiederum rasch zu sinken. Erst mit dem Absinken der Kompensationszone in den Sommer- und Herbstmonaten stieg der Siliziumgehalt des Epilimnions durch die Einmischung von siliziumreicherem Tiefenwasser wieder an. Die vor allem Ende Januar 2001 gemessene sehr geringe Siliziumkonzentration des Epilimnions, die in 2 m Wassertiefe bei 0,2 mg/l lag, deutet auf eine erste frühe Massenvermehrung von Diatomeen nach dem Abschmelzen einer im Winter 2000/2001 vorhandenen dünnen Eisbedeckung des Sees hin.

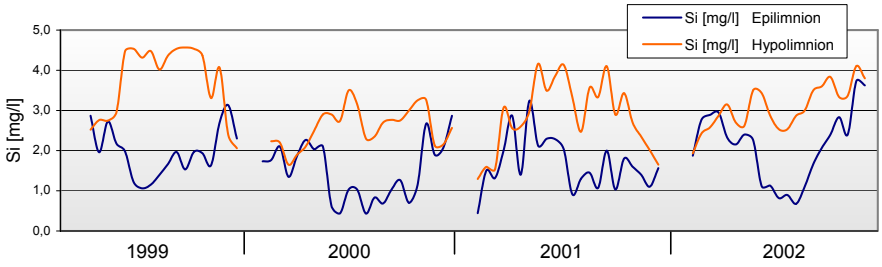


Abb. 28: Siliziumkonzentration [mg/l] im Epilimnion (Mittelwert aus 0 bis 5 m Wassertiefe) und Hypolimnion (Mittelwert aus 7 bis 15 m Wassertiefe) im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes

Die Abbildung 29 veranschaulicht die sich im Jahresverlauf deutlich ändernde Siliziumkonzentration des Wasserkörpers im Pelagial des Sees. Ausgehend von einer nahezu über das gesamte Tiefenprofil ausgeglichenen Si-Konzentration im Winter erhöhte sich die Konzentration im Profundal des Sees jeweils ab Mitte Februar. Dagegen deutet die i.d.R. ab Anfang März einsetzende und bis weit in das Hypolimnion hinabreichende Siliziumzehrung auf eine erste größere Massenvermehrung der Kieselalgen hin. Die beim Absinken zunächst

noch lebenden Algen entziehen dabei auch den meta- und hypolimnischen Wasserschichten Silizium (SCHWOERBEL 1993, WETZEL 2001). Auch das Populationsmaximum, das zwischen Mitte Juni und Ende August für den Rückgang der epilimnischen Siliziumkonzentration auf weniger als 1 mg/l verantwortlich ist, prägte sich bis in das Hypolimnion durch. Während die Siliziumkonzentration im Epilimnion erst mit einsetzender Herbstzirkulation wieder deutlich zunahm, stieg die Konzentration vor allem in 16 bis 19 m Wassertiefe rascher an, was auf eine teilweise Rücklösung von Silizium aus dem Sediment hindeutet. Durch das Absinken der abgestorbenen Diatomeen in das Profundal wird das Silizium somit aus dem oberen Wasserkörper entfernt, so dass es zu keinem kurzgeschlossenen Kreislauf des Siliziums im Epilimnion kommt (SOMMER 1988).

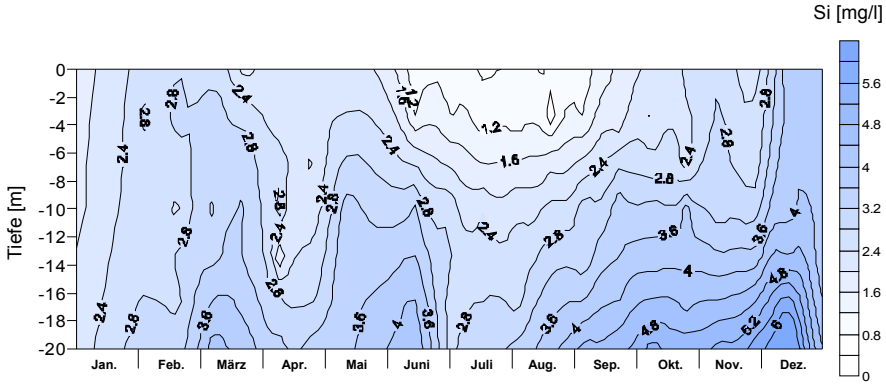


Abb. 29: Siliziumkonzentration [mg/l] des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares 2002

Die Siliziumkonzentration im Ablauf folgte im Untersuchungszeitraum wiederum dem Jahresgang im oberen Wasserkörper des Sees. Im Sammetbach und an der Quelle war dagegen kein Jahresgang der Si-Konzentrationen erkennbar. Die Siliziumgehalte schwankten hier zwischen 2 und 7 mg/l. Der Si-Eintrag durch das oberflächennahe Grundwasser, das durch das Quellwasser repräsentiert wird, sollte aufgrund der höheren Si-Gehalte des Quellwassers größer sein als der Si-Eintrag des Sammetbaches. Der Niederschlag kommt dagegen nicht als Siliziumquelle in Betracht. Hier wurden zu keinem Zeitpunkt Werte von mehr als 0,5 mg/l gemessen (vgl. Tab. 12).

Tab. 12: Mittelwert, Standardabweichung und Stichprobenumfang der Siliziumkonzentration der einzelnen Siliziumquellen während des Untersuchungszeitraumes

Si-Quelle	arith. Mittel [mg/l]	1 s [mg/l]	n
Niederschlag	0,1	0,1	73
Sammetbach	3,3	1,5	84
Quelle	4,7	2,4	46

8 Sedimentationsraten im Pelagial des Holzmaares

Im Zeitraum zwischen April 1999 und Dezember 2002 wurden im Pelagial des Holzmaars an 83 Probenahmeterminen insgesamt 605 rezente Sedimentproben gewonnen. Von diesen entfallen 482 Proben auf ein Fallensystem, mit dem wenige Meter neben der Seemitte-Positionsboje jeweils zwei Sedimentproben in einer Doppelfalle in 3, 7 und 16 m Wassertiefe gewonnen wurden und das im Folgenden als Hauptsystem bezeichnet wird. Da in jeder Tiefe jeweils zwei Proben gewonnen wurden, kann durch den Vergleich ihrer Trockenmassen die Gleichmäßigkeit der Sedimentation überprüft werden. Dabei dient die prozentuale Abweichung der beiden Massen aus einer Doppelfalle von ihrem gemeinsamen Mittelwert als Maß für die Homogenität der Sedimentfänge (vgl. Abb. 30).

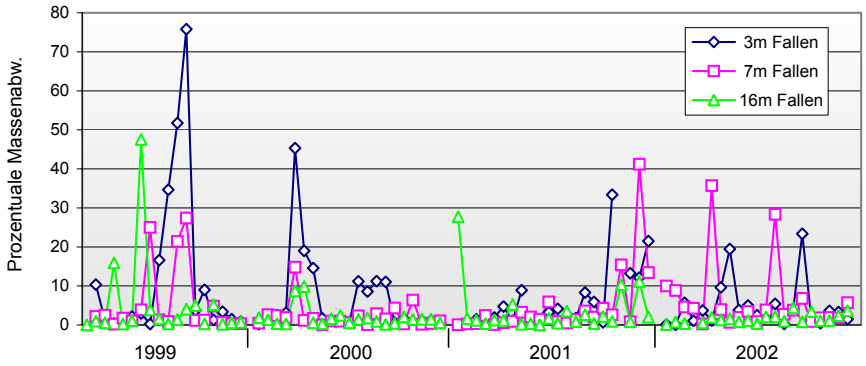


Abb. 30: Vergleich der Sedimentakkumulation in den Sedimentfallen während des Untersuchungszeitraumes; dargestellt ist die prozentuale Abweichung der beiden Massen einer Doppelfalle vom Mittelwert der Falle für jeden Probenahmezeitpunkt

Von den 240 ermittelten Vergleichswerten weisen 31 Werte Abweichungen von mehr als 10 % von ihrem jeweiligen Mittelwert auf. Bei 15 dieser Werte beträgt die Abweichung mehr als 20 %. Überwiegend liegen die Vergleichswerte jedoch in einem Abweichungsbereich zwischen 0 und 10 %, womit der Unterschied der Sedimentfänge innerhalb einer tolerierbaren Schwankungsbreite liegt (ROSA et al. 1991). Auffällig ist die Häufung hoher Abweichungen in den Fängen der Fallen in 3 und 7 m Wassertiefe. Während in der 16-Meter-Falle lediglich in zwei Doppelproben Unterschiede von mehr als 20 % auftraten, wurden in der 3-Meter-Falle insgesamt acht und in der 7-Meter-Falle noch sechs Unterschiede von mehr als 20 % ermittelt. Da sich in den Jahren 2000 und 2001 an drei Probenahmeterminen ein Aal in jeweils einer der 3-Meter-Fallen befunden hat, besteht die Möglichkeit, dass große Mittelwertunterschiede in den 3- und 7-Meter-Fallen auf Sedimentaufwirbelung oder -fraß durch Fische zurückzuführen ist.

Um die Homogenität der Sedimentation im Pelagial des Sees abschätzen zu können und zudem größere Mengen rezenten Probenmaterials zu gewinnen, wurden im Jahr 2002 mit zusätzlichen Sedimentfallen ca. 15 m neben dem oben beschriebenen Fallensystem weitere Sedimentproben in 7 und 16 m Wassertiefe gewonnen. Lediglich bei 3 dieser insgesamt 84 Proben übersteigt die prozentuale Abweichung 10 %. Auch die Trockenmassen der mit diesem zweiten sog. Zusatzsystem gewonnenen Proben sind denen des Hauptsystems sehr ähnlich. Die lineare Korrelation der Mittelwerte der Proben von Haupt- und Zusatzsystem weist mit Korrelationskoeffizienten von r = 0,78 (7-Meter-Fallen) und r = 0,96 (16-Meter-Fallen) nach BÜHL & ZÖFEL (2000) hohe bzw. sehr hohe Zusammenhänge auf.

Aufgrund der Trockenmasse der Sedimentfänge lässt sich die Sedimentationsrate im freien Wasserkörper berechnen, die einen deutlichen jahreszeitlichen Verlauf aufweist. Dabei fallen die Ähnlichkeit zwischen der Sedimentationsrate in 3 und 7 m Wassertiefe und ein deutlich unterschiedlicher Trend der Rate in 16 m Wassertiefe auf (vgl. Abb. 31).

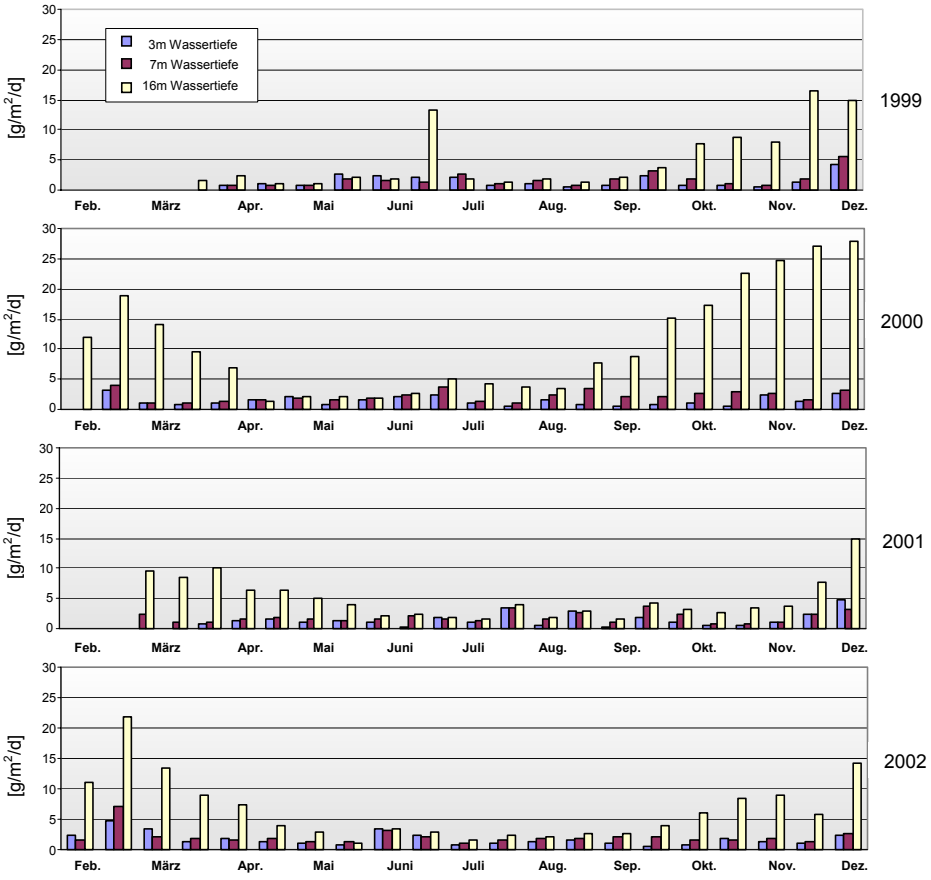


Abb. 31: Mittelwerte der Sedimentationsraten [g/m²/d] im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes

Die Sedimentationsrate in 3 m Wassertiefe inmitten der produktiven Zone des Sees und diejenige in 7 m am unteren Rand des Epilimnions folgten im Untersuchungszeitraum dem gleichen Trend. Während die Rate im Winter und Frühjahr zwischen 2,0 und 7,5 g/m^2/d schwankt, sinkt die Rate zwischen April und Mai auf Massen um 0,8 bis 1,5 g/m^2/d ab, worauf zwischen Juli und September ein sommerliches Maximum der Sedimentationsrate mit Massen zwischen 3,0 und 4,5 g/m^2/d folgt. Nach diesem Maximum ist die Rate leicht rückläufig, um im Spätherbst bzw. mit dem Einsetzen des Winters wieder zu steigen.
Hohe Sedimentationsraten im Frühjahr und während des Sommers deuten auf eine erhöhte Biomasseproduktion hin, die im Frühjahr von Diatomeen und im Sommer von Cyanobakterien dominiert wird. Dass die Sedimentationsrate in 7 m Wassertiefe bis auf wenige Ausnahmen durchweg um den Faktor 1,5 bis 2 über der in 3 m Tiefe, deutet auf eine erhebliche Biomasseproduktion auch in Wassertiefen über 3 m hin.

Die Sedimentationsrate in 16 m Wassertiefe, die der Summe des rezent gebildeten Sediments entsprechen sollte, zeigt dagegen ein völlig anderes Muster. Ab der Mitte des Frühjahrs und während des gesamten Sommers stimmt die Sedimentationsrate weitgehend mit der in 3 und in 7 m Wassertiefe überein, was auf eine gleichmäßige vertikale Sedimentation in diesem Zeitraum schließen lässt. Dagegen ist die Sedimentationsrate in 16 m Wassertiefe zwischen dem Herbst und dem Frühjahr eines jeden Jahres mit Raten bis über 25 g/m^2/d im Vergleich zu den Ausbeuten in 3 und 7 m Tiefe stark überhöht. Die viel höheren Sedimentationsraten in 16 m Wassertiefe, die im Jahre 2000 besonders deutlich waren, lassen sich nicht allein durch die vertikale Sedimentation aus dem Epilimnion in das Profundal des Sees erklären. Vielmehr müssen andere Prozesse für die sehr viel höheren Akkumulationen in der 16-Meter-Falle verantwortlich sein. Da sich die Abkoppelung der Ausbeuten in 16 m Tiefe von der allgemeinen vertikalen Sedimentation auffällig regelmäßig in jedem Herbst einstellte und mit dem Einsetzen des Frühlings wieder zurück ging, scheiden laterale Materialeinträge in Form von Trübeströmen, von denen die Fallen im Epilimnion nicht beeinflusst würden, aus. Auf einen solchen Eintrag deutet vielmehr die nur einmalig vorkommende, untypisch hohe Sommerausbeute in 16 m Wassertiefe am 13.07.1999 hin (vgl. Abb. 31).
Eine Erklärung für die im Vergleich zum Epilimnion sehr hohen Sedimentfänge in 16 m Wassertiefe ist die Resuspension profundalen und lateralen Materials, das nicht bis in das Epilimnion verfrachtet wird, wohl aber in die 16-Meter-Falle gelangt. Dieser Prozess könnte durch die Tiefenausdehnung der durch den Wind induzierten Stromwalze beim Einsetzen der Herbstzirkulation ausgelöst werden (HILTON, LISHMAN & ALLEN 1986). Für einen Einfluss windinduzierter Wasserbewegungen spricht, dass die Sedimentfänge in der 16-Meter-Falle in solchen Zeiträumen besonders hoch waren, in denen an der Klimastation Holzmaar sehr

hohe Windgeschwindigkeiten aufgezeichnet wurden. So korrespondieren die hohen Sedimentationsraten der Frühjahr- und Herbstmonate des Jahres 2000 auffällig mit den in diesen Zeiträumen ermittelten Phasen sehr hoher Windgeschwindigkeiten. Auch die erhöhte Sedimentationsrate im Frühjahr 2002 überschneidet sich mit der im Februar und März 2002 gemessenen hohen Windgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 31 und Abb. 18, Kap. 6.4).
Zusätzlich deuten sehr hohe Eisengehalte von mehr als 2.500 mg/l und Mangangehalte von über 5.000 mg/l in den Wasserproben der Herbst- und Wintermonate, die in 16 und 18 m Wassertiefe gewonnen wurden, auf die Remobilisierung großer Mengen von Eisen- und Manganoxiden und -hydroxiden aus dem Sediment des Sees wegen der sehr niedrigen Redoxverhältnisse durch fehlenden Sauerstoff hin.

8.1 Separierte Diatomeen aus Sedimentfängen der Jahre 2000, 2001 und 2002

Für die Sauerstoffisotopenanalytik des biogenen Opals wurden die Diatomeenvalven aus 27 rezenten Sedimentproben separiert, die in den Jahren 2000 bis 2002 im Pelagial des Holzmaares in Sedimentfallen aufgefangen wurden (vgl. Kap. 4.1.3). Da die Sedimentausbeuten aus den einzelnen Fallen z.T. relativ gering waren, mussten häufig die beiden Proben der Fallenpaare nach einer Rückstellung von jeweils 50 bis 100 mg des Probenmaterials zu einer Mischprobe zusammengeführt werden. Nach der Zerstörung der organischen Substanz mit Wasserstoffperoxyd und der Umsetzung eventuell vorhandener Karbonate zu Kohlenstoffdioxid mit Salzsäure wurden die Valven mittels SPLITT-Fraktionierung von der anorganischen Matrix abgetrennt. Einen Überblick über die Trockenmassen der rezenten Sedimente, aus denen die Valven separiert wurden sowie über die Menge der gewonnenen Kieselschalen gibt die Tabelle 13.

Tab. 13: Nach Siebfraktionen getrennte Ausbeuten von Diatomeenvalven aus rezenten Sedimentproben aus dem Holzmaar; Sedimentationszeitraum jeweils 4 Wochen (Probe vom 13.02.2001 = 6 Wochen)

Probe: HZM 12.09.2000 / 7 m Einwaage (Trockenmasse): 683,4 mg		
Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**2,6**	36,7
10 - 20	**4,1**	27,5
5 - 10	**7,7**	11,6

Probe: HZM 10.10.2000 / 7 m Einwaage (Trockenmasse): 884,3 mg		
Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**3,4**	71,2
10 - 20	**8,2**	23,1
5 - 10	**13,5**	10,9

Probe: HZM 07.11.2000 / 7 m Einwaage (Trockenmasse): 907,8 mg		
Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**4,2**	78,2
10 - 20	**11,0**	25,8
5 - 10	**11,6**	18,4

Probe: HZM 13.02.01 / 7 m Einwaage (Trockenmasse): 1208,2 mg		
Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**2,7**	16,8
10 - 20	**15,9**	13,9
5 - 10	**7,8**	36,2

Tab. 13: Nach Siebfraktionen getrennte Ausbeuten von Diatomeenvalven aus rezenten Sedimentproben aus dem Holzmaar; Sedimentationszeitraum jeweils 4 Wochen (Probe vom 13.02.2001 = 6 Wochen)

Probe: HZM 13.02.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 1100,0 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**1,8**	26,0
10 - 20	**12,8**	75,4
5 - 10	*	

Probe: HZM 13.03.01 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 1195,1 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**5,6**	20,8
10 - 20	**21,7**	14,3
5 - 10	**9,3**	22,3

Probe: HZM 13.03.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 545,2 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**0,5**	23,4
10 - 20	**0,7**	7,2
5 - 10	**0,5**	13,1

Probe: HZM 10.04.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 1008,8 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**0,7**	43,7
10 - 20	**7,5**	39,2
5 - 10	**1,0**	29,1

Probe: HZM 10.04.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 1181,9 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**1,0**	20,4
10 - 20	**10,0**	39,2
5 - 10	**1,0**	10,7

Probe: HZM 08.05.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 807,2 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**43,4**	79,0
10 - 20	**45,4**	37,2
5 - 10	**24,8**	39,0

Probe: HZM 08.05.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 1094,9 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**13,8**	30,5
10 - 20	**22,3**	14,2
5 - 10	**21,9**	27,5

Probe: HZM 06.06.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 1401,6 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**1,5**	24,1
10 - 20	**17,7**	9,5
5 - 10	**6,1**	17,1

Probe: HZM 06.06.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 868,8 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**0,7**	56,6
10 - 20	**16,4**	92,1
5 - 10	**0,5**	30,2

Probe: HZM 03.07.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 938,2 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**9,7**	37,8
10 - 20	**25,0**	22,2
5 - 10	**10,0**	27,6

Probe: HZM 03.07.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 1069,9 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**0,1**	31,3
10 - 20	**7,2**	30,3
5 - 10	**1,3**	65,4

Probe: HZM 31.07.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 990,3 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**3,3**	75,6
10 - 20	**10,0**	131,3
5 - 10	**4,6**	33,9

Probe: HZM 31.07.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 964,3 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**2,8**	64,1
10 - 20	**0,2**	16,9
5 - 10	**0,4**	29,2

Probe: HZM 28.08.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 1536,3 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**3,9**	138,0
10 - 20	**18,3**	61,5
5 - 10	**7,2**	63,1

Tab. 13: Nach Siebfraktionen getrennte Ausbeuten von Diatomeenvalven aus rezenten Sedimentproben aus dem Holzmaar; Sedimentationszeitraum jeweils 4 Wochen (Probe vom 06.02.2002 = 9 Wochen)

Probe: HZM 28.08.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 1031,0 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**3,8**	57,3
10 - 20	**13,4**	21,4
5 - 10	**3,8**	28,0

Probe: HZM 25.09.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 869,7 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**1,6**	69,7
10 - 20	**14,0**	64,2
5 - 10	**5,3**	29,3

Probe: HZM 25.09.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 1142,2 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**3,2**	82,3
10 - 20	**11,9**	65,1
5 - 10	**9,3**	54,9

Probe: HZM 23.10.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 617,4 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**0,6**	7,6
10 - 20	**2,5**	18,0
5 - 10	**5,8**	8,0

Probe: HZM 23.10.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 1049,3 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**8,7**	24,3
10 - 20	**3,2**	30,9
5 - 10	**0,7**	16,3

Probe: HZM 20.11.2001 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 639,0 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**1,8**	25,6
10 - 20	**3,0**	18,4
5 - 10	**0,3**	7,0

Probe: HZM 20.11.2001 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 931,7 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**2,3**	17,5
10 - 20	**4,7**	44,4
5 - 10	**0,7**	18,5

Probe: HZM 06.02.2002 / 7 m
Einwaage (Trockenmasse): 1567,0 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**2,0**	87,8
10 - 20	**18,3**	29,7
5 - 10	*	

Probe: HZM 06.02.2002 / 16 m
Einwaage (Trockenmasse): 3000,2 mg

Siebfraktion [µm]	**Auswage** [mg]	
	Diatomeen	Minerale
20 - 80	**1,9**	128,9
10 - 20	**21,8**	140,9
5 - 10	*	

* Valven dieser Siebfraktion wurden nicht aus der Sedimentprobe separiert.

Die in der Tabelle 13 zusammengestellten Ergebnisse veranschaulichen die große Heterogenität der separierbaren Kieselschalen. Die Valvenmengen der einzelnen Siebfraktionen liegen zwischen 0,3 und 45,4 mg und sind zumeist für massenspektrometrische Wiederholungsmessungen ausreichend, da ca. 1,5 mg Diatomeenvalven für die Erzeugung einer Messgasprobe benötigt werden. Ausbeuten, die für die Erzeugung einer Messgasprobe zu gering ausfielen, verdeutlichen zudem die Notwendigkeit einer möglichst vollständigen Gewinnung aller Diatomeenschalen aus den Sedimentproben, was durch die SPLITT-Fraktionierung gewährleistet wird (vgl. Kap. 4.3).

Der größte Anteil an der Gesamtmasse der rezenten Sedimentproben aus dem pelagischen Lebensraum des Holzmaares besteht aus organischer Substanz, die vor der Trennung der Proben in die drei Größenfraktionen zerstört wurde, sowie aus Partikeln mit einer Größe unter 5 µm. Die Fraktion <5 µm besteht dabei nahezu ausschließlich aus Tonpartikeln und enthält zudem vereinzelte Bruchstücke von Diatomeenvalven. Da die Gewinnung einer tonpartikelfreien 5-10 µm-Fraktion die Verdünnung der Siebfraktion <5 µm auf eine Suspensionsmenge von 200 bis 250 Litern nötig macht und die in der Arbeitsgruppe zur Anwendung kommende SPLITT-Zelle ausschließlich für die Partikeltrennung von Korngrößen zwischen 5 und 100 µm geeignet ist, wurde die Siebfraktion <5 µm jeweils verworfen.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind in der Abbildung 32 diejenigen Mengen von Diatomeenvalven dargestellt, die aus 1.000 Milligramm des jeweiligen rezenten Sediments separiert werden können. Aufgrund der Resuspension von Partikeln an der Sedimentoberfläche des Sees und des Transports von resuspendiertem Material in die 16-Meter-Falle wird die Ausbeute von Diatomeenvalven aus der 16-Meter-Falle in der Abbildung 32 unterschätzt. Die tatsächlich in dieser Falle aufgefangene Menge an Valven ist durchaus mit der Menge zu vergleichen, die jeweils in der 7-Meter-Falle akkumulierte.

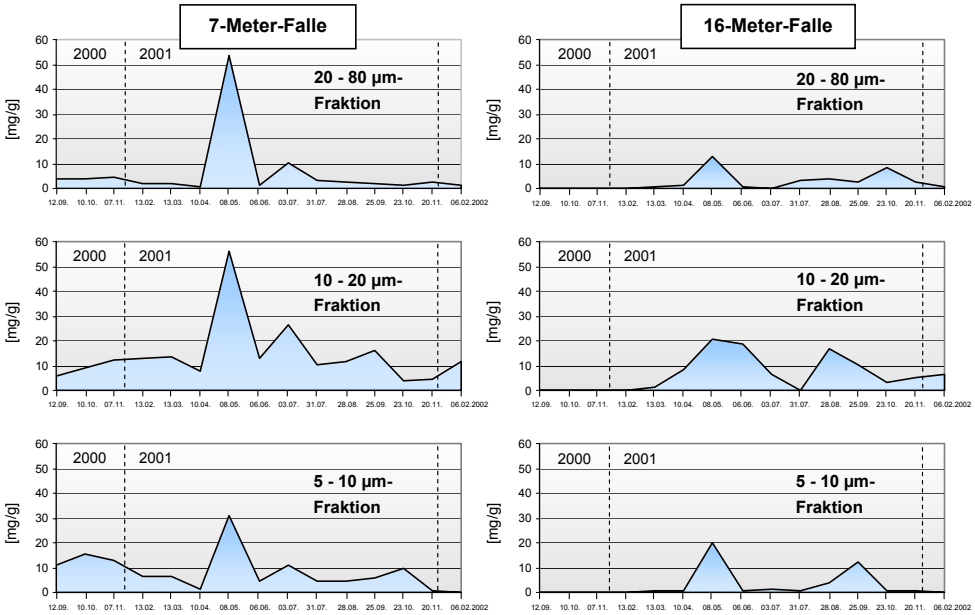


Abb. 32: Separierbare Mengen von Diatomeenvalven aus 1.000 mg der rezenten Sedimentproben aus der 7- und 16-Meter-Falle im Pelagial des Holzmaares im Zeitraum 12.09.2000 bis 06.02.2002 (im Jahr 2000 wurden keine Valven aus den Sedimenten der 16-Meter-Falle separiert)

Die auf akkumulierte Massen von jeweils 1,0 Milligramm bezogenen Valvenausbeuten aus den unterschiedlichen Größenfraktionen veranschaulichen die sich im Jahresverlauf verändernde Produktivität innerhalb der Diatomeenpopulation. In den Herbst- und Wintermonaten des Jahres 2000 fand ein kontinuierliches Diatomeenwachstum statt, wobei hauptsächlich Valven der 5-10 µm- und der 10-20 µm-Fraktion gebildet wurden und größere Individuen eher selten waren. Im April 2001 erfolgte dann eine ausgeprägte Frühjahrsblüte mit sehr hoher Produktivität auf die winterliche Phase vergleichsweise geringen Algenwachstums. Die kurze Phase der stark erhöhten Frühjahrsproduktivität beschränkte sich dabei wahrscheinlich auf ca. zwei Wochen. So korreliert das rasche Anwachsen der Diatomeenpopulation auffällig mit dem Absinken der Siliziumkonzentration ab Mitte April 2001 in den obersten 4 m des epilimnischen Wasserkörpers (vgl. Abb. 33). Der Si-Gehalt sank in einem Zeitraum von nur 14 Tagen um ca. 50 % ab. In den direkt an der Oberfläche des Sees gewonnenen Wasserprobenroben betrug der Rückgang sogar nahezu 80 %. Diese geringe Siliziumkonzentration führte dann wahrscheinlich zum abrupten Einbruch der Diatomeenpopulation und damit zum Ende der Frühjahrsblüte.

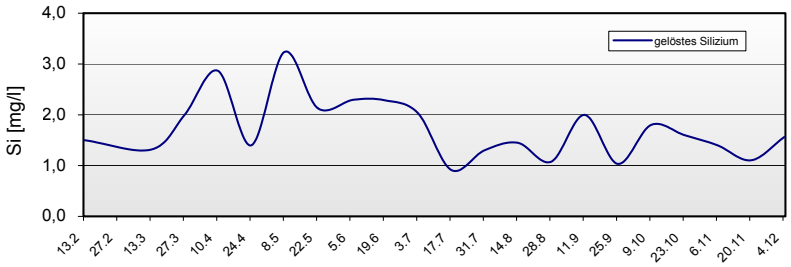


Abb. 33: Gehalt an gelöstem Silizium im oberen Epilimnion (0 bis 5 m Wassertiefe) im Pelagial des Holzmaares im Jahr 2001

Aus der Sedimentprobe, die am 08.05.2001, also im Anschluss an die Frühjahrsblüte gewonnen wurde, konnten aus allen drei Größenfraktionen große Mengen von Valven gewonnen werden, wenngleich das Maximum der Produktivität bei der 10-20- und der 20-80 µm-Fraktion, d.h. bei eher größeren Individuen lag. Aufgrund der Mitte April lediglich schwach ausgeprägten thermischen Stratifizierung des Wasserkörpers kam es nach der starken Siliziumzehrung durch die Frühjahrsblüte zur Einmischung von siliziumreicherem Tiefenwasser und damit zum Wiederanstieg der Siliziumkonzentration im oberen Epilimnion. In Folge dessen wuchs die Diatomeenpopulation erneut an, was wiederum zu einem Absinken der Siliziumkonzentration führte. Die in lakustrinen Ökosystemen auf eine Phase geringer sommerlicher Produktion häufig folgende Diatomeen-Herbstblüte zwischen Ende August und Mitte November war im Holzmaar im Jahre 2001 nur sehr schwach ausgeprägt

und erreichte ihr Maximum Mitte September. Der Anteil der 20-80 µm-Fraktion nahm vom Sommer an stetig ab und erreichte Ende Oktober ein absolutes Minimum. Der Anteil der 10-20 µm-Fraktion verringert sich weniger rasch und sank erst Ende Oktober deutlich ab, wogegen der Anteil der 5-10 µm-Fraktion zwischen Juli und November nahezu konstant blieb (vgl. Abb. 32). Die lediglich schwach ausgeprägte Herbstblüte der Vegetationsperiode 2001 kann auf die in diesem Zeitraum sehr geringe Konzentration des gelösten Siliziums im Epilimnion zurückgeführt werden, die sich ab Mitte Juli aufgrund der starken Siliziumzehrung durch die Frühjahrsblüte einstellte. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt ausgeprägten thermischen Stratifizierung des Wasserkörpers konnte keine Siliziumnachlieferung aus tieferen Wasserschichten mehr erfolgen. Da auch der Niederschlag nicht als Siliziumquelle in Frage kommt und der Einfluss des Sammetbaches gering ist, blieb eine massive Herbstblüte in der Vegetationsperiode 2001 aus. Ob der Verlauf der Diatomeenpopulation der Vegetationsperiode 2001 charakteristisch für die derzeitige Situation im Holzmaar ist, kann erst durch die Separation von Kieselschalen aus den rezenten Sedimentproben weiterer Vegetationsperioden geklärt werden.

Die Akkumulation von Diatomeenvalven in der 16-Meter-Falle, die als Maß für die Sedimentation der Kieselschalen in das Profundal des Sees angesehen werden, unterscheiden sich deutlich von denen der 7-Meter-Falle. Während im Jahre 2001 in 7 m Wassertiefe schon zu Beginn der Vegetationsperiode bis teilweise mehr als 10 mg biogener Opal in einem Gramm rezenten Sediments enthalten waren, war die Ausbeute der 16-Meter-Falle gering. Erst die hohe Individuenzahl der Frühjahrsblüte führte auch zu größeren Massen biogenen Opals in der 16-Meter-Falle, wenngleich die Menge deutlich hinter der in 7 m Wassertiefe gewonnenen zurückblieb. In den Sedimenten der 16-Meter-Falle sind anders als bei der 7-Meter-Falle zwei Ausbeutemaxima festzustellen, die eine starke Frühjahrs- und eine weniger stark ausgeprägte Herbstblüte der Kieselalgen widerspiegeln.

Wie bereits beschrieben, wird die Menge der in der 16-Meter-Falle akkumulierten Kieselschalen aufgrund der Resuspension von Eisen- und Manganoxyden und -hydroxyden und mineralischen Partikeln der Tonfraktion unterschätzt. Die in der 16-Meter-Falle aufgefangene Menge an Kieselschalen ist durchaus mit derjenigen zu vergleichen, die in der 7-Meter-Falle akkumuliert. Jedoch könnte eine geringere Akkumulation in 16 Metern Wassertiefe auf die wichtige Stellung der Diatomeen innerhalb der pelagischen Nahrungskette hinweisen. Sogenannte Filtrierer wie *Rotatoria*, *Cladocera* und *Copepoda*, die einzelne Individuen oder Kolonien von Kieselalgen fangen, bilden die Hauptmasse des herbivoren lakustrinen Zooplanktons (WILK-WOZNIAK et al. 2001). Da die Gesamtnutzung der lebenden Algenpopulationen durch herbivore Arten bis zu 100 % betragen kann (HORN & HORN 2000), sind Zeiträume ohne Sinkverluste auch bei relativ hoher Individuenzahl im oberen Epilimnion des Holzmaares durchaus möglich.

9 Stabile Isotope des Sauerstoffs

9.1 Niederschlag

Die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des Niederschlags folgten im gesamten Untersuchungszeitraum einem Jahresgang mit relativ hohen Isotopenverhältniswerten im Sommer und niedrigen Werten im Winter (vgl. Abb. 34). Die Amplitude der Niederschlags-$\delta^{18}O_{H2O}$-Werte über den gesamten Beobachtungszeitraum betrug 13,0 ‰, die mittlere Amplitude innerhalb der vier untersuchten Jahre 8,1 ‰. Mit -2,70 ‰ vs. V-SMOW wurde am 7. September 1999 der höchste und mit -15,76 ‰ vs. V-SMOW am 3. April 2002 der niedrigste $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert ermittelt.

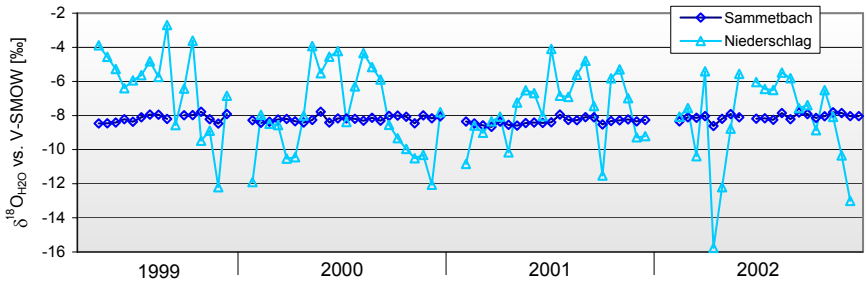


Abb. 34: Sauerstoffisotopenverhältnisse [‰] vs. V-SMOW des Niederschlags und im Sammetbach während des Untersuchungszeitraumes

Zwischen dem gewichteten Mittelwert des Niederschlags-$\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes und dem Mittelwert der zum Akkumulationszeitraum an der Klimastation Holzmaar ermittelten Lufttemperatur besteht mit r = 0,78 ein positiver linearer Zusammenhang (n = 79), wie er z.B. auch von SIEGENTHALER & OESCHGER (1980) beschrieben wird. Aus diesem positiven Zusammenhang lässt sich für die Klimastation Holzmaar zwischen dem Mittelwert der Lufttemperatur während eines Niederschlagsakkumulationszeitraumes und dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des im gleichen Zeitraum gesammelten Niederschlags ein Temperaturgradient von 0,31 ‰/°C ableiten. Dieser Gradient liegt innerhalb des Bereiches der für die mitteleuropäischen Klimastationen Groningen und Wien veröffentlichten saisonalen Gradienten zwischen 0,23 ‰/°C (Groningen/Niederlande; 53,21° N, 6,57° E; 0 m) und 0,39 ‰/°C (Wien/Österreich; 48,25° N, 16,30° E; 203 m) (ROZANSKI, ARAGUÁS-ARAGUÁS & GONFIANTINI 1992).

Der arithmetische Mittelwert aller im Untersuchungszeitraum gewonnenen Niederschlagsproben beträgt -7,61 ‰ vs. V-SMOW (n = 79) und das über die Menge gewichtete arithmetische Mittel -7,78 ‰ vs. V-SMOW (n = 79). Diese Ergebnisse stimmen gut mit dem zehnjährigen gewichteten arithmetischen Mittel der Periode 1977 bis 1987 des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes des Niederschlags an der Klimastation Trier-Petrisberg überein, der mit -7,75 ‰ vs. V-SMOW angegeben wird (IAEA 1992).

9.2 Zuflüsse

Im Gegensatz zu den beträchtlichen Schwankungen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des Niederschlags sind die $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert-Variationen der Zuflüsse durch den Sammetbach und die Quelle gering. Außerdem ist hier kein Jahresgang erkennbar (vgl. Abb. 34 und Tab. 14). Vor allem an der Quelle liegen die Variationen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Bereich der analytischen Genauigkeit (2s = 0,2 ‰).

Trotz einer Gesamtlänge des Sammetbaches von nur ca. 2.000 m von seiner Quelle bis zum Eintritt in das Holzmaar sind Verdunstung, Durchmischung und Verzögerung bei der Abflussbildung derart stark, dass an der Bachmündung ebenfalls kein Jahresgang der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte feststellbar ist. Noch stärker als bei der Abflussbildung kommt es auch bei der Grundwasserneubildung zu dämpfenden Effekten (FÖRSTEL & HÜTZEN 1982), so dass die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte an der Quellschüttung praktisch konstant sind.

Tab. 14: Mittelwert, Standardabweichung und Stichprobenumfang der Sauerstoffisotopenwerte der einzelnen Wasserquellen während des Untersuchungszeitraumes

Wasserquelle	arithm. Mittel [‰]	1 s [‰]	n
Niederschlag*	-7,78	2,98	79
Sammetbach	-8,21	0,21	84
Quelle	-8,52	0,09	44

* gewichteter arithmetischer Mittelwert

9.3 Wasserkörper des Holzmaares

Die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaars folgten während des Untersuchungszeitraumes einem ausgeprägten Jahresgang, dessen zeitlich-räumliche Veränderungen den Veränderungen der Wassertemperatur folgten. Dabei fällt wiederum der abgekoppelte Verlauf der Änderungen im Epilimnion von denen im Hypolimnion des Sees auf (vgl. Abb. 35). Die $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert-Variationen im Wasserkörper des Sees führten zur Ausbildung eines vertikalen und eines horizontalen $\delta^{18}O_{H2O}$-Gradienten, wobei der horizontale Gradient nahezu ausschließlich auf das Epilimnion des Sees beschränkt blieb.

Ausgehend von homogenen $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten zwischen Februar und März mit einem maximalen vertikalen $\delta^{18}O_{H2O}$-Gradienten von 0,15 ‰, stiegen die epilimnischen $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte bis Ende August bzw. Anfang September stark an, was zu sommerlichen Vertikalgradienten von 1,75 bis 1,85 ‰ führte. Mit der Abschwächung und der folgenden Auflösung der sich über den Sommer eingestellten thermischen Stratifizierung wurde auch der $\delta^{18}O_{H2O}$-Gradient wieder schwächer; der Wasserkörper erreichte im Winter erneut über das gesamte

Tiefenprofil nahezu einheitliche Werte. Dabei lagen die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Wasserkörper des Sees zum Zeitpunkt der Vollzirkulation am Jahresende jeweils um 0,40 ‰ über den März- und Aprilwerten, die jedoch bis zum folgenden Frühling wieder erreicht wurden.

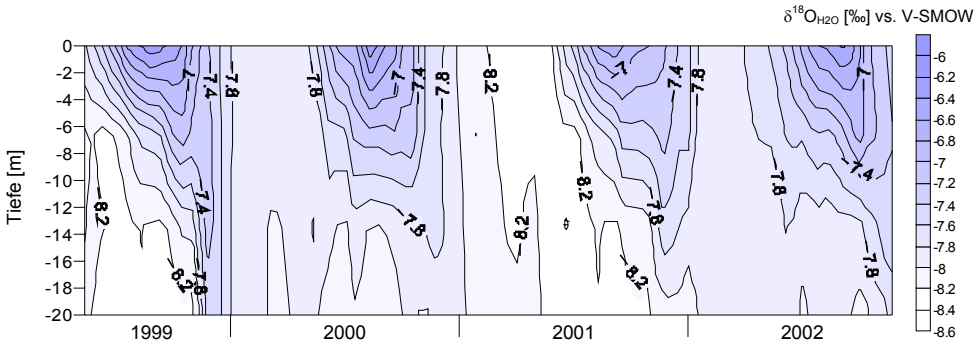


Abb. 35: Variation der Sauerstoffisotopenverhältnisse [‰] vs. V-SMOW des Wasserkörpers im Pelagial des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes

Die Amplitude des horizontalen $\delta^{18}O_{H2O}$-Gradienten schwankte im Epilimnion im Jahresverlauf um durchschnittlich 1,8 ‰. An der Wasseroberfläche, an der die größten Veränderungen auftraten, stiegen die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte von durchschnittlich -8,1 bis -7,9 ‰ vs. V-SMOW um 1,8 bis 1,9 ‰ auf Werte um -6,2 ‰ vs. V-SMOW. Dagegen variierten die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Hypolimnion lediglich um durchschnittlich 0,40 ‰ und lagen insgesamt in einem Bereich von -8,3 bis -7,8 ‰.

Die Veränderungen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im oberen Wasserkörper des Sees spiegelten sich auch im Ablauf wider, dessen jährliche Amplitudenvariation 1,7 ‰ betrug und parallel zu der des Epilimnions im Pelagial des Sees verlief (r = 0,97).

9.4 Wasserkörper des Meerfelder Maares und Meerbach

Um die Frage zu klären, ob die $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen der Zuläufe und des Wasserkörpers des Holzmaares als repräsentativ für die Seen der Region angesehen werden können, wurde das Meerfelder Maar mit dem Meerbach in die Untersuchungen einbezogen. Sowohl für den Wasserkörper des Meerfelder Maares als auch für den Meerbach, ca. 3.500 m unterhalb seiner Quelle, stehen $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte der Jahre 2000 bis 2002 zur Verfügung.

Die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des Wasserkörpers im Pelagial des Meerfelder Maares folgten in dem zweijährigen Untersuchungszeitraum ebenfalls einem ausgeprägten Jahresgang, der jedoch mit einem vertikalen Gradienten von durchschnittlich 1,0 ‰ und einem horizontalen Gradienten von durchschnittlich 0,9 ‰ hinter den $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen im Holzmaar zurück-

blieb. Auch im Meerfelder Maar herrschten während des Frühlings homogene $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte über das gesamte Tiefenprofil vor, wobei der vertikale Gradient um durchschnittlich 0,1 ‰ geringer ausfiel als derjenige im Holzmaar. Ähnlich wie im Holzmaar konnte auch im Meerfelder Maar beobachtet werden, dass die $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert-Veränderungen des epilimnischen Wasserkörpers nur teilweise und sehr gedämpft in das Hypolimnion des Sees übertragen werden (vgl. Abb. 36).

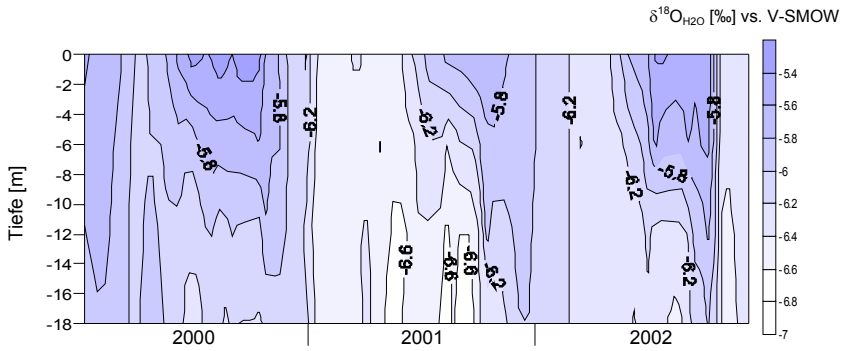


Abb. 36: Variation der Sauerstoffisotopenverhältnisse [‰] vs. V-SMOW des Wasserkörpers im Pelagial des Meerfelder Maares während des Untersuchungszeitraumes 2000 bis 2002

Im Gegensatz zu der sich vom Holzmaar unterscheidenden Stärke der $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen im Meerfelder Maar sind die $\delta^{18}O$-Werte des Meerbaches mit denen des Sammetbaches vergleichbar. Der $\delta^{18}O_{H2O}$-Mittelwert des Meerbaches lag ca. 3.500 m unterhalb seiner Quelle bei 8,32 ±0,22 ‰ vs. V-SMOW (n = 53). Die $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen des Meerbaches und des Sammetbaches können damit als nahezu identisch angesehen werden (vgl. Kap. 9.2).

9.5 Rezente Diatomeen des Holzmaares aus Sedimentfängen der Jahre 2000, 2001 und 2002

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffisotopenverhältnis biogenen Opals und der Wassertemperatur im Zeitraum der Biomineralisation des Opals zu untersuchen, wurden insgesamt 67 $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals rezenter Diatomeenvalven ermittelt. Die Diatomeen wurden in 3 Größenfraktionen aus Sedimentfallenmaterial gewonnen, das in den Jahren 2000, 2001 und 2002 mit Hilfe eines Fallensystems in sieben und 16 Metern Wassertiefe im Pelagial des Holzmaares aufgefangen wurde. Sofern die aus dem Sediment separierte Valvenmenge dies zuließ, wurden Mehrfachbestimmungen der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte durchgeführt. Alle Ergebnisse wurden gegen einen kalibrierten Laborstandard (Kieselgur) geeicht und auf der V-SMOW Skala angegeben (CRAIG 1957). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 15 zusammengestellt.

Tab. 15: Sauerstoffisotopenverhältniswerte des biogenen Opals von Diatomeenvalven aus Sedimentfallenmaterial des Holzmaares der Jahre 2000 bis 2002; ± x = maximale Abweichung vom Mittelwert; n = Anzahl der produzierten Messgasproben

Probe: HZM 12.09.2000 / 7 m			Probe: HZM 10.10.2000 / 7 m			Probe: HZM 07.11.2000 / 7 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**27,0**	**n = 1**	20 - 80	**28,1**	**n = 1**	20 - 80	**28,7**	**n = 1**
10 - 20	**27,5**	**n = 1**	10 - 20	**28,1 ± 0,2**	**n = 2**	10 - 20	**28,8 ± 0,3**	**n = 3**
5 - 10	**27,1 ± 0,1**	**n = 3**	5 - 10	**27,8 ± 0,2**	**n = 2**	5 - 10	**28,7 ± 0,1**	**n = 2**
Probe: HZM 13.02.2001 / 7 m			Probe: HZM 13.02.2001 / 16 m			Probe: HZM 13.03.2001 / 7 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**29,2 ± 0,1**	**n = 2**	20 - 80	**29,5**	**n = 1**	20 - 80	**28,5 ± 0,1**	**n = 3**
10 - 20	**29,4 ± 0,2**	**n = 3**	10 - 20	**29,3 ± 0,2**	**n = 4**	10 - 20	**28,3 ± 0,1**	**n = 5**
5 - 10	**29,0 ± 0,1**	**n = 3**	5 - 10	*		5 - 10	**28,5 ± 0,1**	**n = 3**
Probe: HZM 13.03.2001 / 16 m			Probe: HZM 10.04.2001 / 7 m			Probe: HZM 10.04.2001 / 16 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80			20 - 80	**		20 - 80	**28,0**	**n = 1**
10 - 20	**28,3 *** **	**n = 1**	10 - 20	**27,8 ± 0,2**	**n = 4**	10 - 20	**28,5 ± 0,3**	**n = 3**
5 - 10			5 - 10	**28,0**	**n = 1**	5 - 10	**28,6**	**n = 1**
Probe: HZM 08.05.2001 / 7 m			Probe: HZM 08.05.2001 / 16 m			Probe: HZM 06.06.2001 / 7 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**27,7 ± 0,1**	**n = 3**	20 - 80	**28,8 ± 0,4**	**n = 2**	20 - 80	**26,2**	**n = 1**
10 - 20	**27,0 ± 0,1**	**n = 8**	10 - 20	**28,8 ± 0,2**	**n = 4**	10 - 20	**26,4 ± 0,2**	**n = 2**
5 - 10	**27,1 ± 0,1**	**n = 2**	5 - 10	**28,0 ± 0,1**	**n = 3**	5 - 10	**26,4 ± 0,1**	**n = 2**
Probe: HZM 06.06.2001 / 16 m			Probe: HZM 03.07.2001 / 7 m			Probe: HZM 03.07.2001 / 16 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**28,6**	**n = 1**	20 - 80	**27,1 ± 0,1**	**n = 2**	20 - 80	**	
10 - 20	**28,4 ± 0,1**	**n = 3**	10 - 20	**27,4 ± 0,2**	**n = 4**	10 - 20	**28,4 ± 0,1**	**n = 2**
5 - 10	**		5 - 10	**27,5 ± 0,2**	**n = 3**	5 - 10	**28,4**	**n = 1**
Probe: HZM 31.07.2001 / 7 m			Probe: HZM 31.07.2001 / 16 m			Probe: HZM 28.08.2001 / 7 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**26,8**	**n = 1**	20 - 80	**28,0**	**n = 1**	20 - 80	**28,7**	**n = 1**
10 - 20	**26,6 ± 0,1**	**n = 2**	10 - 20	**		10 - 20	**26,9 ± 0,1**	**n = 3**
5 - 10	**26,8 ± 0,1**	**n = 2**	5 - 10	**		5 - 10	**27,1 ± 0,1**	**n = 4**

* Die Diatomeenvalven der Korngrößenfraktion wurden nicht aus dem rezenten Sediment separiert.

** Aufgrund zu geringer Mengen separierbarer Valven konnte kein $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert erzeugt werden.

*** Aufgrund sehr geringer Mengen separierbarer Valven wurden die 3 Teilproben zur Messgaserzeugung zu einer Mischprobe zusammengeführt.

Tab. 15: Sauerstoffisotopenverhältniswerte des biogenen Opals von Diatomeenvalven aus Sedimentfallenmaterial des Holzmaares der Jahre 2000 bis 2002; ± x = maximale Abweichung vom Mittelwert; n = Anzahl der produzierten Messgasproben

Probe: HZM 25.09.2001 / 7 m			Probe: HZM 25.09.2001 / 16 m			Probe: HZM 23.10.2001 / 7 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**26,8**	**n = 1**	20 - 80	**27,7**	**n = 1**	20 - 80	**27,6**	**n = 1**
10 - 20	**26,8 ± 0,3**	**n = 4**	10 - 20	**27,3 ± 0,2**	**n = 3**	10 - 20	**27,5**	**n = 1**
5 - 10	**26,7 ± 0,2**	**n = 3**	5 - 10	**26,4 ± 0,2**	**n = 3**	5 - 10	**28,0 ± 0,2**	**n = 3**
Probe: HZM 23.10.2001 / 16 m			Probe: HZM 20.11.2001 / 7 m			Probe: HZM 20.11.2001 / 16 m		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**27,6 ± 0,2**	**n = 4**	20 - 80	**28,6**	**n = 1**	20 - 80	**28,7**	**n = 1**
10 - 20	**27,4 ± 0,1**	**n = 2**	10 - 20	**28,7**	**n = 1**	10 - 20	**28,6 ± 0,2**	**n = 2**
5 - 10	**		5 - 10	**		5 - 10	**	
Probe: HZM 06.02.2002 / 7 m			Probe: HZM 06.02.2002 / 16 m					
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]		Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]				
20 - 80	**28,6**	**n = 1**	20 - 80	**29,8**	**n = 1**			
10 - 20	**28,7 ± 0,1**	**n = 3**	10 - 20	**29,6 ± 0,1**	**n = 4**			
5 - 10	*		5 - 10	*				

* Die Diatomeenvalven der Korngrößenfraktion wurden nicht aus dem rezenten Sediment separiert.

** Aufgrund zu geringer Mengen separierbarer Valven war keine Messgaserzeugung möglich.

Die Variation der Sauerstoffisotopenverhältnisse der in den Jahren 2000 bis 2002 gewonnenen rezenten Diatomeenvalven beträgt 4,3 ‰. In den Wintermonaten sind die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals relativ hoch, in den Sommermonaten bleiben die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte hingegen eher niedrig. Mit 29,8 ‰ vs. V-SMOW wurde am 06.02.02 der höchste, mit 25,5 ‰ vs. V-SMOW am 06.06.01 der niedrigste $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert erreicht.

Am 24.08.1999 wurde mit Hilfe eines Kastengreifers eine Sedimentprobe aus den oberen 15 cm der Sedimente entnommen. Bei der aktuellen Sedimentationsrate im Pelagial des Sees zwischen 10 und 12 mm/a (ZOLITSCHKA 1990), beträgt das maximale Alter der aus dieser Kastengreiferprobe separierten Diatomeenvalven zwischen 10 und 12,5 Jahre. Die Valven wurden ebenfalls innerhalb von drei Größenfraktionen separiert. Die Ergebnisse von insgesamt 14 durchgeführten Wiederholungsmessungen sind der Tabelle 16 zu entnehmen.

Tab. 16: Sauerstoffisotopenverhältniswerte des biogenen Opals der Diatomeenvalven aus einer Kastengreiferprobe

Kastengreiferprobe - Holzmaar (24.08.1999)		
Siebfraktion [µm]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ vs. V-SMOW [‰]	
20 - 80	**30,1 ± 0,1**	**n = 5**
10 - 20	**30,1 ± 0,2**	**n = 5**
5 - 10	**29,8 ± 0,2**	**n = 4**

Die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals der Diatomeenvalven, die aus dem Oberflächensediment des Holzmaares separiert wurden, liegen im Bereich der aus dem rezenten Sedimentfallenmaterial separierten Valven. Die auffällig gute Reproduzierbarkeit der Messwerte deutet auf eine vollständige Entfernung aller mineralischen Partikel bei der Separation mittels SPLITT-Fraktionierung hin und verdeutlicht die hervorragende Eignung dieser Methode zur quantitativen Kieselschalenseparation aus lakustrinen Sedimenten.

10 Die regionalen Witterungsverhältnisse in der Westeifel

Bei der Frage nach der Übertragbarkeit regionaler Klimainformationen aus der Atmosphäre in den Wasserkörper des Holzmaares soll zunächst die Repräsentanz der an der „Klimastation Holzmaar“ gewonnenen Wetterinformationen im Bezug auf die regionalen Witterungsverhältnisse der Westeifel untersucht werden. Als wichtigste Ausgangsgrößen für die Übertragung des Temperatursignals in den Wasserkörper des Holzmaares sind die Globalstrahlung und die eng an diese gekoppelte Lufttemperatur anzusehen. Zur Überprüfung der regionalen Repräsentanz der an der Station Holzmaar gewonnenen Werte wurden die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur der Jahre 1999, 2000 und 2001 der Klimastation Manderscheid (50° 06´ N, 6° 48´ W; 403 m ü. NN / DWD) herangezogen, die sich ca. 5 km südwestlich des Holzmaares befindet. Da an dieser Klimastation keine Messung der Globalstrahlung erfolgt, wurden für diesen Parameter korrespondierende Tagesmittelwerte der ca. 50 km südöstlich gelegenen Klimastation Trier-Petrisberg (49° 45´ N, 6° 40´ E; 265 m ü. NN / DWD) der Jahre 1999, 2000 und 2001 verwendet.

Ein Vergleich der Datensätze von Globalstrahlung und Lufttemperatur zeigt die sehr starke lineare Korrelation der am Holzmaar gemessenen Werte mit denjenigen an den Klimastationen des DWD ermittelten Parametern (vgl. Abb. 37 und Abb. 38). Die etwa einen Meter über der Wasseroberfläche des Holzmaares gemessenen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur liegen im Sommer geringfügig unter den in Manderscheid ermittelten Werten. Die systematischen Temperaturdifferenzen von ca. 1,5 °C in den Monaten Juni bis August deuten dabei auf die dämpfende Wirkung der Evaporation von der Wasseroberfläche des Sees hin. Auch die Mittelwerte der Globalstrahlung sind am Holzmaar etwas geringer als an der Station Trier-Petrisberg, wobei hier kein systematischer Unterschied erkennbar ist. Die lineare Korrelation ist zwar geringer als die der Tagesmittelwerte der Temperatur, jedoch liegt mit einer Varianz von 0,924 nach BÜHL & ZÖFEL (2000) für den Parameter Globalstrahlung eine sehr hohe lineare Korrelation vor. Auffällig ist die deutlich breitere Streuung der Globalstrahlungswerte. Dies ist auf die unterschiedlich stark bzw. unterschiedlich häufig abschattende Wirkung von durchziehenden Wolkenfeldern und die sich

insbesondere während der Morgenstunden der Frühjahrsmonate über der Wasseroberfläche des Holzmaares bildenden Nebelfelder zurückzuführen.

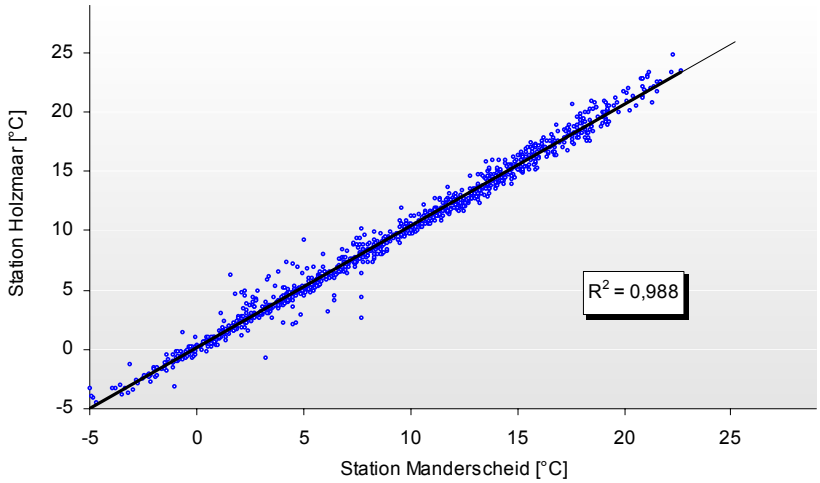


Abb. 37: Zusammenhang zwischen den Tagesmittelwerten der Lufttemperatur [°C] an den Stationen Holzmaar und Manderscheid für die Jahre 1999 bis 2001

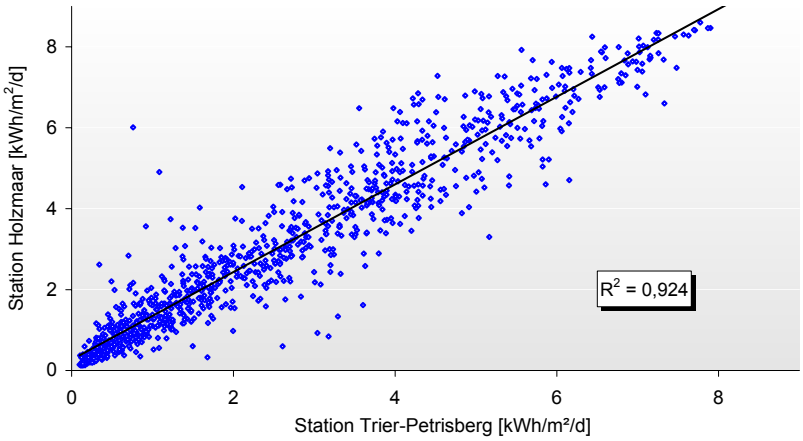


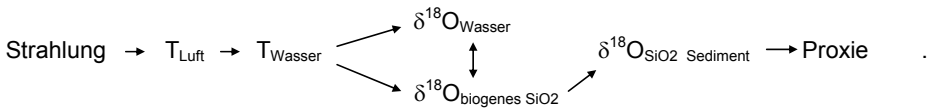
Abb. 38: Zusammenhang zwischen den Tagesmittelwerten der Globalstrahlung [kWh/m^2/d] an den Stationen Holzmaar und Trier-Petrisberg für die Jahre 1999 bis 2001

Zusammenfassend kann aufgrund dieser Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass die derzeit an der „Klimastation Holzmaar“ aufgezeichneten meteorologischen Größen die regionalen Witterungsverhältnisse der Westeifel repräsentieren. Mikroklimatische Auswirkungen des Wasserkörpers sowie der durch den Kraterwall geschützten Lage der „Klimastation“ treten gegenüber den makroklimatischen Einflüssen deutlich in den Hintergrund.

11 Übertragung von atmosphärischen Klimasignalen in den Wasserkörper des Holzmaares

Um die im Sediment des Holzmaares enthaltenen klimageschichtlichen Informationen deuten zu können, müssen sämtliche bei der Aufzeichnung, Übertragung und Speicherung von klimatischen Informationen ablaufenden Prozesse verstanden werden. Dabei ist der Zusammenhang zwischen den im Sediment gespeicherten und in verschlüsselter Form vorliegenden Stellvertreterdaten und dem Klima, genauer der Witterung im Bildungszeitraum der Proxies, von ausschlaggebender Bedeutung.

Bezogen auf die mögliche Eignung des biogenen Opals, der von Süßwasserdiatomeen gebildet wurde, als Paläothermometer muss der Übertragungsmechanismus des Temperatursignals aus der Atmosphäre in den See und über das SiO_2-Skelett der Diatomeen in das Sediment bekannt sein. Vereinfacht folgt die Übertragung dem Pfad



11.1 *Strahlung, Luft- und Wassertemperatur - Übertragung des Temperatursignals*

Der größte Teil der in den See eindringenden Strahlung wird nahe der Oberfläche absorbiert und in Wärme umgewandelt. Da die Energieübertragung an der Kontaktzone Atmosphäre-Wasser stattfindet, verlaufen die Jahresgänge der Luft- und der Wassertemperatur an der Gewässeroberfläche annähernd synchron. Die gegenüber der Wassertemperatur niedrigere Lufttemperatur ist dabei auf die höhere Wärmekapazität des Wasserkörpers zurückzuführen (vgl. Abb. 39).

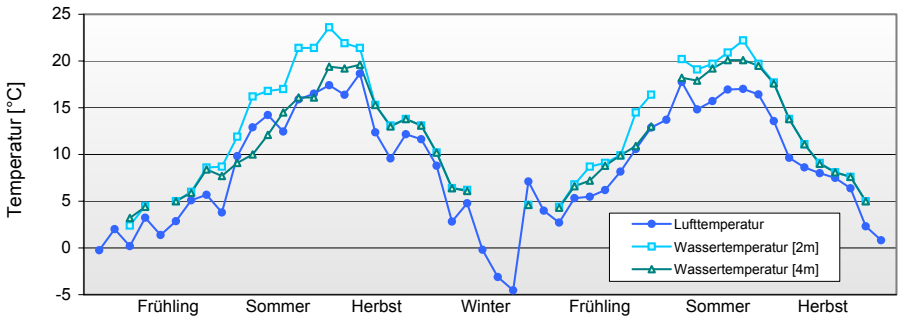


Abb. 39: 14tägiger Mittelwert der Lufttemperatur an der Station Holzmaar [°C] sowie 14tägige Mittelwerte der Wassertemperatur [°C] in 2 und 4 m Tiefe (2001 und 2002)

Der zeitlich-räumliche Temperaturverlauf ist an der Schnittstelle Atmosphäre/Wasser nahezu identisch. Die lineare Korrelation zwischen einem Mittelwert der Lufttemperatur und der oberflächennahen Wassertemperatur (T_{Luft}/T_{0m}) ist mit einem Korrelationskoeffizienten von r = 0,96 (n = 79) als sehr hoch zu bezeichnen. Dies gilt außerdem für die obersten 2 m des Wasserkörpers, weshalb in der Abbildung 39 auf die Darstellung der Wassertemperatur direkt unter der Wasseroberfläche (T_{0m}) verzichtet wurde. Die Übertragung des Temperatursignals in größere Wassertiefen erfolgt mit einer zeitlichen Verzögerung bei gleichzeitiger Abnahme der jeweils maximal erreichbaren Wassertemperatur. Während für die lineare Beziehung T_{Luft}/T_{4m} noch ein Korrelationskoeffizient von r = 0,88 (n = 79) erreicht wird, so beträgt dieser für T_{Luft}/T_{6m} nur noch 0,62 (n = 79).
Damit liegt am Holzmaar ein hoher linearer Zusammenhang zwischen der Globalstrahlung, der Lufttemperatur und der Wassertemperatur des oberen Epilimnions vor. Die Übertragung des Temperatursignals in größere Wassertiefen findet dagegen mit einer zeitlichen Verschiebung und Signaldämpfung statt. Aufgrund einer nicht auszuschließenden vertikalen Ausdehnung des Lebensraumes einzelner Diatomeentaxa während der als Blüte bezeichneten Massenvermehrung bis in Wassertiefen von 5 bis 6 m, muss der Einfluss der zeitlichen Verzögerung und der Signaldämpfung auf die in den Valven gespeicherten Temperaturinformationen berücksichtigt werden.

Da das Witterungssignal der Lufttemperatur aus der Atmosphäre in den obersten Wasserkörper des Sees übertragen wird, sollte eine Modellierung der Lufttemperatur ausschließlich aufgrund der Kenntnis der Wassertemperatur des oberen Epilimnions möglich sein. Nur wenn es gelingt, die Lufttemperatur aus einem Mittelwert der Wassertemperatur des Lebensraumes der Diatomeen zu rekonstruieren, besteht auch die generelle Möglichkeit einer Übertragung möglicher, in fossilen Valven gespeicherten Temperaturinformationen in Lufttemperatur-Proxiewerte. Erst eine solche Übertragung erlaubt es, aufgrund des Sauerstoffisotopenverhältnisses von fossilen Kieselschalen aus den Sedimenten des Sees, Rückschlüsse auf paläoklimatische Veränderungen zu treffen.
Für ein einfaches Regressionsmodell zur Rekonstruktion der Lufttemperatur aufgrund der Kenntnis der sich im Jahresverlauf ändernden Wassertemperatur im obersten Epilimnion des Holzmaares dient der arithmetische Mittelwert der direkt unter der Oberfläche des Sees sowie in 2 und 4 m Wassertiefe im 14tägigen Intervall gemessenen Wassertemperatur. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$T_{Luft} = 1{,}014 * T_{H2O\ 0\text{-}5m}\ [T_{0m} + 2 * T_{2m} + 2 * T_{4m}\ )/\ 5] - 3{,}5$$

Dabei ist T_{Luft} als Mittelwert aller in der „Klimastation Holzmaar“ aufgezeichneten Tagesmittelwerte der Lufttemperatur zu verstehen, die zwischen jeweils zwei Probenahmeterminen der Feldkampagne liegen. Die direkt unter der Wasseroberfläche gemessene Temperatur

(T_{0m}) geht lediglich mit einer Gewichtung von 20 % in den Mittelwert der Wassertemperatur ein, da T_{0m} eine Temperaturinformation des Wasserkörpers von 0 bis 1 m Tiefe zulässt, während z.B. T_{2m} als Temperaturmittelwert des Wasserkörpers zwischen 1 und 3 m Tiefe zu verstehen ist.

Wie aus der Abbildung 40 hervorgeht, stimmt die aufgrund der Wassertemperatur des obersten Epilimnions rekonstruierte Lufttemperatur sehr gut mit der in der „Klimastation Holzmaar“ aufgezeichneten Lufttemperatur überein. In den Sommermonaten überschätzt das Modell die tatsächlich gemessene Lufttemperatur um 1,5 bis maximal 2,6 °C (im Juli 2001 sowie im August 2000). Auffälliger sind dagegen Abweichungen in den Wintermonaten, in denen die modellierten Werte hinter den Messdaten zurück bleiben und die Abweichungen 2,0 bis maximal 3,1 °C betragen.

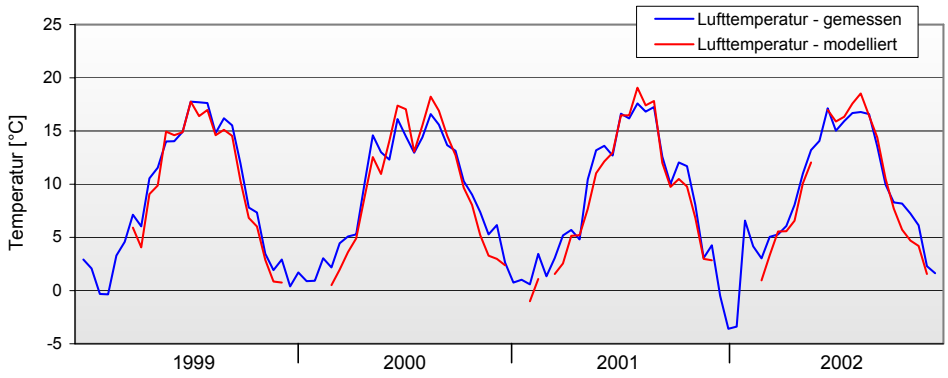


Abb. 40: 14tägiger Mittelwert der Lufttemperatur an der Station Holzmaar [°C] und aus der Wassertemperatur in 0, 2 und 4 m Wassertiefe rekonstruierte Lufttemperatur [°C] während des Untersuchungszeitraumes

Insgesamt kann die in der „Klimastation Holzmaar“ gemessene Lufttemperatur über den Zeitraum hoher Biomasseproduktion grundsätzlich modelliert werden. Lediglich im Zeitraum des Wassertemperaturmaximums überschätzt das Modell die Lufttemperatur um durchschnittlich 2 °C. In Zukunft sollte daher die Entwicklung eines Modells erfolgen, dass die dämpfende Wirkung des Wasserkörpers auf die Erwärmung berücksichtigt. Zu diesem Zweck ist die Instrumentalisierung der nahe der Seemitte installierten „Klimastation“ mit Unterwasser-Thermistoren geplant, mit denen das Aufzeichnungsintervall der Wassertemperatur bedeutend verkleinert werden kann. Aufgrund der gegenüber der Atmosphäre wesentlich höheren Wärmekapazität des Wasserkörpers ist jedoch auch bei einer höher aufgelösten Messung der Wassertemperatur immer mit einer Überschätzung der Lufttemperatur durch das Modell zu rechnen, da sich das einmal erwärmte Wasser weit weniger schnell abkühlt als die Luft. Die Möglichkeit der Rekonstruktion der Lufttemperatur mit Hilfe der Wassertemperatur des oberen Epilimnions, i.e. des Lebensraumes der Diatomeen, ist jedoch gegeben.

11.2 Intraannuelle und interannuelle Sauerstoffisotopenvariationen

Der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert im Wasserkörper des Holzmaares, das sich als Folge der mittleren Witterungsverhältnisse über den Untersuchungszeitraum einstellte, betrug -8,2 ‰ vs. V-SMOW. Das Isotopenverhältnis entspricht dem vierjährigen Mittelwert des homogenen Wasserkörpers in den Zeiten der Vollzirkulation im Frühling und Winter eines jeden Jahres und soll daher als $\delta^{18}O_{H2O}$-Basiswert des Sees unter den gegenwärtigen Witterungsbedingungen angenommen werden. Dieser Wert wird durch das Zusammenwirken der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des einströmenden Grundwassers, des Sammetbaches und des Niederschlages sowie die Evaporation von der Gewässeroberfläche bestimmt (vgl. Kap. 9.2 und 9.3). Ausgehend von homogenen $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten im gesamten Wasserkörper entwickelt sich im Holzmaar ein ausgeprägter Jahresgang der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte, der eng an den Gang von Luft- und Wassertemperatur gekoppelt ist und wesentlich durch die Verdunstung verursacht wird. Der Einfluss des Niederschlags und der Zuläufe auf die intraannuellen Sauerstoffisotopenvariationen kann hingegen als gering bezeichnet werden, da die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des gewichteten Niederschlagsmittels und der Zuläufe, die zudem wenig variieren, nur geringfügig vom $\delta^{18}O_{H2O}$-Basiswert des Sees abweichen (vgl. Kap. 9.2). Gleichzeitig ist die den See speisende Wassermenge relativ gering, sodass auch bei leicht abweichenden $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten des Zulaufes nicht mit einer starken Auswirkung auf den $\delta^{18}O_{H2O}$-Jahresgang im Wasserkörper zu rechnen wäre. Mit der über den Sommer fortschreitenden Erwärmung des oberen Wasserkörpers reichert sich das schwerere ^{18}O-Isotop im Epilimnion des Holzmaares um durchschnittlich 1,7 ‰ gegenüber dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Basiswert an, während der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Hypolimnions nahezu unverändert bleibt (vgl. Abb. 41).

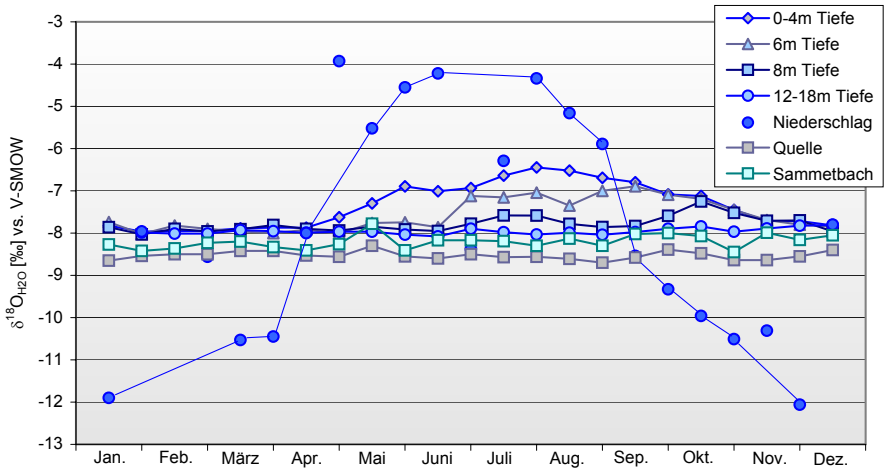


Abb. 41: Intraannuelle Veränderungen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Wasserkörper des Holzmaares und der Wasserquellen des Sees im Jahre 2000

Die intraannuellen Veränderungen des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes gegenüber dem Basiswert des Sees werden wesentlich durch die Verdunstung gesteuert, die nur das Epilimnion direkt beeinflusst. Diesen Effekt verstärken die isotopisch leichteren Sommerniederschläge, die sich aufgrund der stabilen sommerlichen thermischen Schichtung des Wasserkörpers lediglich mit dem Wasser des Epilimnions mischen. Der saisonale Effekt findet nahezu ausschließlich im Epilimnion statt, zumal ein großer Teil des in der warmen Jahreszeit zugeführten isotopisch leichteren Wassers den See während der Zeit der thermischen Stratifizierung durch Verdunstung und über den Ablauf wieder verlässt. Wie die Abbildung 41 verdeutlicht, findet die Übertragung des Isotopensignals in größere Wassertiefe mit einer zeitlichen Verzögerung und zudem mit einer erheblichen Dämpfung statt. So erreicht der intraannuelle Temperaturgradient des Wasserkörpers in 16 bis 18 m Wassertiefe lediglich Maximalwerte um ca. 0,4 ‰.

Da sich der Lebensraum der Diatomeen im Holzmaar im wesentlichen auf die oberen 4 m des Wasserkörpers erstreckt, ist mit einem Einfluss der intraannuellen $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen des oberen Epilimnions auf den $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des biogenen Opals der Valven zu rechnen. Bei einer Amplitudenvariation der Wassertemperatur des oberen Epilimnions von durchschnittlich 18 °C beträgt die Variation der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte etwa 1,7 ‰. Die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des oberen Epilimnions variieren somit um 0,1 ‰/°C, wobei sich der höchste $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert jeweils ca. zwei Wochen nach dem Erreichen der maximalen Wassertemperatur einstellte. Ein Korrelationskoeffizient von r = 0,72 deutet dabei auf eine hohe lineare Korrelation zwischen der Temperatur und dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des oberen Epilimnions hin. Berücksichtigt man die zweiwöchige Verschiebung zwischen der Wassertemperatur und dem Sauerstoffisotopenverhältnis des Wassers, steigt der Korrelationskoeffizient auf r = 0,87.

Neben den beschriebenen intraannuellen Isotopenvariationen im Wasserkörper des Holzmaares ist die Frage nach einem Zusammenhang zwischen den Isotopenvariationen und der derzeitigen klimatischen Situation, genauer der Witterung in der Westeifel, von großer Bedeutung für die Fragestellung dieser Arbeit. Die Abhängigkeit des saisonalen Musters der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Epilimnion des Holzmaares von der regionalen Witterung kann durch den Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten vier Jahresgänge der Isotopenvariationen überprüft werden. Aufgrund der guten Übereinstimmung der intraannuellen Isotopenvariationen können die Jahresgänge 1999 bis 2002 als annähernd identisch angesehen werden, denn auftretende Unterschiede der Sauerstoffisotopenvariationen liegen im Rahmen der analytischen Genauigkeit (vgl. Abb. 42). Die saisonalen Variationen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Epilimnion des Holzmaares können damit als direkte Folge der Jahresgänge der regionalen Luft- und Wassertemperatur angesehen werden.

11.3 Interannuelle Sauerstoffisotopenvariationen in den Wasserkörpern von Holzmaar und Meerfelder Maar

Ob der witterungsinduzierte Jahresgang der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte im Epilimnion des Holzmaares als repräsentativ für die Seen der Westeifel angesehen werden kann, wurde durch den Vergleich mit $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten aus dem Wasserkörper des Meerfelder Maares überprüft. Wie aus der Abbildung 42 hervorgeht, ist der Jahresgang der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte der beiden Seen vergleichbar. Allerdings beträgt die jährliche $\delta^{18}O_{H2O}$-Amplitudenvariation im Epilimnion des Meerfelder Maares mit durchschnittlich 1,0 ‰ nur ca. 60 % der $\delta^{18}O_{H2O}$-Variation im Epilimnion des Holzmaares. Da die Witterungsverhältnisse an beiden Seen als ähnlich anzusehen sind (vgl. Kap. 10), müssen die divergierenden absoluten $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte der beiden Seen auf Unterschiede in ihren hydrologischen Systemen zurückgeführt werden.

Das Oberflächen/Volumen-Verhältnis beider Seen ist etwa gleich (vgl. Kap. 3.5). Trotzdem ist ein stärkerer Einfluss der Verdunstung am ca. 90 m niedriger gelegenen Meerfelder Maar durchaus denkbar, was höhere $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte, jedoch auch eine Erhöhung der saisonalen Isotopenvariation zur Folge hätte. Wahrscheinlicher ist, dass die am Meerfelder Maar z.Z. durchgeführte Tiefenwasserableitung zu einer relativen Anreicherung von isotopisch leichtem Wasser führt (SCHARF 1987). Ein oberflächlicher Ablauf, aus dem das isotopisch schwere Wasser den See verlassen würde, fehlt am Meerfelder Maar. Lediglich bei sehr hohem Wasserstand, der ausschließlich in den Wintermonaten auftritt, wird auch Oberflächenwasser über einen Überlauf abgeleitet. Da die Ableitung des Oberflächenwassers jedoch ausschließlich im Zeitraum der Vollzirkulation erfolgt, ist eine Auswirkung auf den $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wasserkörpers nicht zu erwarten.

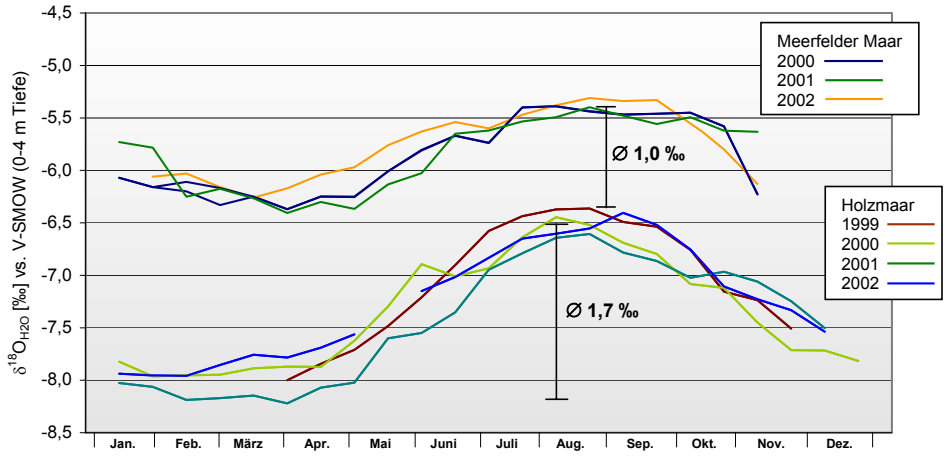


Abb. 42: Saisonale Variationen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte [‰] vs. V-SMOW des oberen Epilimnions (Mittelwert aus 0, 2 und 4 m Wassertiefe) des Holzmaares und des Meerfelder Maares während des Untersuchungszeitraumes; zur besseren Übersichtlichkeit wurden keine Fehlerbalken eingezeichnet (2 s = ± 0,15 ‰)

Die im Vergleich zum Meerfelder Maar und anderen mitteleuropäischen Seen hohen intraannuellen Variationen der Sauerstoffisotope im Wasserkörper des Holzmaares deuten auf einen geringen Grundwasserzustrom und sehr stabile Schichtungsverhältnisse während der sommerlichen thermischen Stagnationsphase hin. Zudem treten im Holzmaar die Auswirkungen starker Zu- und Abläufe gegenüber dem Einfluss der Verdunstung stark zurück, die vor allem in großen Seen zu deutlich geringeren $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen führen (VON GRAFENSTEIN et al. 1999, LÜCKE & CASPER 1996).

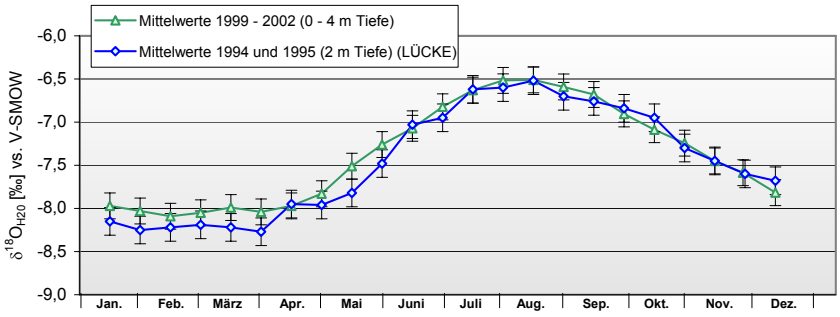


Abb. 43: Die saisonale Variation der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte [‰] vs. V-SMOW des oberen Epilimnions (Mittelwert aus 0, 2 und 4 m Wassertiefe) des Holzmaares während des Untersuchungszeitraumes sowie Mittelwerte 1994 und 1995 aus 2 m Tiefe nach LÜCKE 1998; 2 s = ± 0,15 ‰ bzw. ± 0,16 ‰

Die im Rahmen dieser Arbeit am Holzmaar und am Meerfelder Maar gewonnenen Erkenntnisse zu den intraannuellen Sauerstoffisotopenvariationen in den Wasserkörpern beider Seen decken sich weitgehend mit den 1998 von LÜCKE vorgestellten Ergebnissen (vgl. Abb. 43).

Mit der hier vorliegenden Untersuchung liegt nun eine vierjährige Studie zu den intra- und interannuellen Sauerstoffisotopenvariationen des Wasserkörpers eines kleinen, von seinem Einzugsgebiet wenig beeinflussten Sees vor. Die vorgestellten Ergebnisse belegen die direkte Reaktion des Wasserkörpers des Holzmaares auf klimatische Einflüsse, i.e. Strahlungs- bzw. Temperatureinflüsse und verdeutlichen damit die hervorragende Eignung des Holzmaares zum Studium des Transfers von Witterungs- bzw. Klimainformationen aus der Atmosphäre in den Wasserkörper des Sees.

12 Die Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals rezenter Diatomeen des Holzmaares

12.1 Variationen der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte und Auswirkungen der $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen

Wie in Kapitel 11 gezeigt wurde, folgt der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert im oberen Wasserkörper des Holzmaares einem ausgeprägten Jahresgang. Dieser wird im Wesentlichen durch die Verdunstung von relativ leichten $H_2{}^{16}O$-Molekülen verursacht, wodurch sich gleichzeitig die schwereren $H_2{}^{18}O$-Moleküle im Epilimnion des Sees anreichern. Solange die ausgeprägte sommerliche thermische Stratifizierung des Wasserkörpers anhält, überträgt sich die $H_2{}^{18}O$-Anreicherung nicht in das Hypolimnion des Sees. Um mit Hilfe der Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals von Süßwasserdiatomeen die Wassertemperatur im Zeitraum des Algenwachstums zu rekonstruieren, müssen derartige Veränderungen des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes im Lebensraum der Diatomeen berücksichtigt werden. Denn nur aufgrund der Kenntnis der Parameter $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert des biogenen Opals und $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert lässt sich die Sauerstoffisotopenfraktionierung zwischen der Wasser und dem biogenen Opal der Gerüstsubstanz der Kieselalgen berechnen (vgl. Kap. 11).

Im Folgenden wird auf der Basis dieser Erkenntnisse eine Beziehung zwischen der Wassertemperatur und dem Sauerstoffisotopenverhältnis des biogenen Opals der im pelagischen Lebensraum des Holzmaares wachsenden Diatomeen abgeleitet. Bestimmt man eine solche Beziehung über einen möglichst weiten Temperaturbereich des Wasserkörpers, so kann eine Kalibrierung der Fraktionierung beim Valvenaufbau rezenter Diatomeen erreicht werden. Der daraus folgende Gradient für die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung der rezenten Diatomeen ist anschließend als Grundlage für die Rekonstruktion von Paläowassertemperaturen des Holzmaares mit Hilfe von im Sediment des Sees abgelagertem biogenem Opal nutzbar.

In der Tabelle 17 sind alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte zusammen mit der zugehörigen durchschnittlichen Wassertemperatur und dem zugehörigen $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers im Lebensraum der Algen zusammengestellt. Die Diatomeenvalven wurden in den drei Größenklassen 20-80, 10-20 und 5-10 µm separiert und sofern die Menge biogenen Opals ausreichend war das Sauerstoffisotopenverhältnis der einzelnen Größenklassen bestimmt. Bei den aufgeführten Temperatur- und $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten handelt es sich um Mittelwerte des oberen Epilimnions, d.h. einer Wassertiefe zwischen null und fünf Metern, die dem überwiegenden Lebensraum der Süßwasserdiatomeen entspricht. Aus den $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten und den zugehörigen $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten wurde die Fraktionierung [$\varepsilon_{Opal\text{-}Wasser}$] für den jeweiligen Akkumulationszeitraum berechnet und dem entsprechenden Mittelwert der

Wassertemperatur [T_{H2O}] mit [T_{0m} + (2 * T_{2m}) + (2 * T_{4m}) / 5] gegenübergestellt. Die Wassertemperatur, die direkt unterhalb der Wasseroberfläche gemessen wurde [T_{0m}] geht bei dieser Berechnung nur mit einer Gewichtung von 20 % in den jeweiligen Mittelwert ein, da T_{0m} lediglich eine Information von null bis einem Meter Wassertiefe zulässt. Dagegen ist die Wassertemperatur T_{2m} als Mittelwert des Wasserkörpers zwischen einem und drei Metern Tiefe zu verstehen. Gleiches gilt für die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte der entsprechenden Wasserproben.

Tab. 17: $\delta^{18}O_{SiO2}$-Mittelwerte der rezenten Diatomeenproben, Mittelwerte der zum Bildungszeitpunkt der Valven herrschenden Wassertemperatur sowie zugehörige $\delta^{18}O_{H2O}$-Mittelwerte; ε gibt die jeweils berechnete gewichtete Fraktionierung ($\approx \delta^{18}O_{SiO2} - \delta^{18}O_{H2O}$) der Proben aus der 7-Meter-Falle an.

Datum der Probenahme		2000*			2001											2002
		12.09.	10.10.	07.11.	13.02.	13.03.	10.04.	08.05.	06.06.	03.07.	31.07.	28.08.	25.09.	23.10.	20.11.	06.02.
Wassertemperatur 0-4 m [°C]		19,8	15,6	11,0	3,6	4,8	6,5	9,4	13,6	17,1	20,4	21,2	16,7	13,3	9,9	4,7
$\delta^{18}O_{H2O}$ [‰] 0-4 m		-6,6	-6,9	-7,2	-8,0	-8,2	-8,3	-8,3	-8,0	-7,6	-7,1	-6,8	-6,9	-7,0	-7,1	-7,9
$\delta^{18}O_{SiO2}$ [‰]																
7m-	20-80 µm	27,0	28,1	28,7	29,2	28,5	**	27,7	26,2	27,1	26,8	28,7	26,8	27,6	28,6	28,6
Falle	10-20 µm	27,5	28,1	28,8	29,4	28,3	27,7	27,0	26,4	27,4	26,6	26,9	26,8	27,5	28,7	28,7
	5-10 µm	27,8	27,1	28,7	29,0	28,5	28,0	27,3	26,4	27,5	26,8	27,1	28,0	26,7	***	***
16m-	20-80 µm				29,5	28,3	28,0	28,8	28,6	**	28,0	27,1	28,9	27,6	28,7	29,8
Falle	10-20 µm				29,3	28,3	28,5	28,8	28,4	28,4	**	28,6	28,5	27,3	28,6	29,6
	5-10 µm				***	28,3	28,6	27,9	**	28,4	**	27,1	28,4	27,1	***	***
ε [‰]																
7m-	20-80 µm	33,8	35,2	36,2	37,5	37,0		36,3	34,5	35,0	34,2	35,7	33,9	34,8	35,9	36,8
Falle	10-20 µm	34,3	35,2	36,3	37,7	36,8	36,3	35,6	34,7	35,3	34,0	33,9	33,8	34,7	36,1	37,0
	5-10 µm	34,5	34,2	36,2	37,3	37,0	36,6	35,9	34,7	35,4	34,2	34,1	35,1	33,9		

* Im Jahr 2000 wurden ausschließlich Proben in 7 Metern Wassertiefe gesammelt.

** Aufgrund einer sehr geringen Menge enthaltener Valven konnte kein $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert ermittelt werden.

*** Die Valven der 5-10 µm-Größenklasse wurden nicht aus dem jeweiligen Sediment separiert.

Im Verlauf des Jahres 2001 kam es im oberen Epilimnion des Sees zwischen dem 13. Februar und dem 28. August zu einem Temperaturanstieg von 3,6 °C auf 21,3 °C. Im gleichen Zeitraum stieg der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert um 1,2 ‰. Der aus den drei Größenklassen gemittelte $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert des biogenen Opals der Februarprobe beträgt 29,2 ‰, der Wert der Augustprobe 27,5 ‰, was einer Änderung von 1,7 ‰ entspricht (vgl. Tab. 17). Ohne Berücksichtigung des $\delta^{18}O_{H2O}$-Quellwertes ergibt aus der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Variation von 1,7 ‰ und der gleichzeitig gemessenen Temperaturvariation von 17,5 °C ein Gradient $\Delta\delta^{18}O_{SiO2}/\Delta T$ von ca. 0,10 ‰/°C. Bei Berücksichtigung der entsprechenden $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte vom 13. Februar und vom 28. August, d.h. der Fraktionierung [$\varepsilon_{Opal\text{-}Wasser}$], ergibt sich für das Jahr 2001 eine Variation von $\Delta\delta^{18}O_{SiO2}$ 3,2 ‰, woraus ein Gradient von ≈ 0,18 ‰/°C resultiert (vgl. Tab. 18). Die Gegenläufigkeit von $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten und $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen führt damit zu einer erheblichen Verstärkung des Isotopensignals.

Tab. 18: Sauerstoffisotopenveränderungen im biogenen Opal rezenter Diatomeenvalven des Holzmaares der Vegetationsperiode 2001 ohne [a] bzw. mit [b] Effekt der Berücksichtigung der $\delta^{18}O_{H2O}$-Variationen im Epilimnion

	$\delta^{18}O_{H2O}$		$\varepsilon \approx \delta^{18}O_{SiO2} - \delta^{18}O_{H2O}$		$\delta^{18}O_{SiO2}$	Gradient
	3,7 °C	21,2 °C	3,7 °C	21,2 °C	Δ [‰]	[‰/°C]
a	konstant		29,2	27,5	1,7	0,10
b	-8,0	-6,8	37,7	34,5	3,2	0,18

Bezogen auf eine $\delta^{18}O_{SiO2}$-Veränderung von 1,0 ‰ innerhalb eines Paläodatensatzes müsste mit Hilfe des Gradienten **a** (Tab. 18), der den $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert im Zeitraum des Algenwachstums unberücksichtigt, d.h. konstant lässt, auf eine Temperaturänderung des Wasserkörpers von 10,0 °C geschlossen werden. Bei Berücksichtigung sich verändernder $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte gemäß Gradient **b** (Tab. 18) beträgt die resultierende Temperaturänderung dagegen lediglich 5,6 °C. Der Unterschied von 4,4 °C verdeutlicht, dass nicht der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert des biogenen Opals, sondern ausschließlich die Fraktionierung [1000 ln α ((1000 + $\delta^{18}O_{SiO2}$) / (1000 + $\delta^{18}O_{H2O}$)) ≈ $\varepsilon_{SiO2\text{-}H2O}$ = $\delta^{18}O_{SiO2}$ - $\delta^{18}O_{H2O}$] die Wassertemperatur im Zeitraum des Algenwachstums widerspiegelt. Eine Transferbeziehung, die die $\delta^{18}O_{H2O}$-Amplitude im Wasserkörper des Übertragungsmediums unberücksichtigt ließe, würde daher dazu führen, dass mögliche Temperaturänderungen in der Vergangenheit deutlich überschätzt würden.

12.2 Das temperaturabhängige Sauerstoffisotopensignal im biogenen Opal rezenter Diatomeen

Das Sauerstoffisotopenverhältnis des biogenen Opals der im pelagischen Lebensraum des Holzmaares aufwachsenden Diatomeen ist aufgrund der als Gleichgewichtsreaktion ablaufenden Isotopenfraktionierung temperaturabhängig (vgl. Kap. 2.3). Die Kenntnis des $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wertes der Diatomeenvalven und des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes des Wassers, in dem die Algen den Opal zu ihrer Gerüstsubstanz polymerisieren, ermöglicht daher, einen Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur und dem $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert des biogenen Opals abzuleiten. Der Gradient der Änderung der Fraktionierung bezogen auf die Veränderung der Wassertemperatur [$\Delta\varepsilon/\Delta T$] wird als Temperaturkoeffizient [τ] bezeichnet. Dieser Koeffizient stellt die Stärke der Veränderung der Fraktionierung für jede Temperatur dar (vgl. Kap. 2.3). Dieser theoretischen Überlegung zufolge sollte zwischen der Fraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares und dem Temperaturintervall des Wassers innerhalb der Vegetationsperiode der Algen eine Beziehung nachweisbar sein.

Die aufgeführten theoretischen Überlegungen wurden im Rahmen dieser Arbeit im Holzmaar erstmalig in einem rezenten lakustrinen Ökosystem überprüft. In den Jahren 2000 bis 2002 wurden rezente Sedimente in einer Sedimentfalle aufgefangen, die im Pelagial des Sees in sieben Metern Wassertiefe, wenig unterhalb des Lebensraumes der planktonischen Diatomeen, installiert und in einem 28tägigen Rhythmus geleert wurde. Unter Einbeziehung aller 15 in der Zeit vom 12.09.2000 bis zum 06.02.2002 aufgefangenen Proben ergab sich für das Temperaturintervall zwischen 3 und 22 °C und unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen der Fraktionierung und der Wassertemperatur ein Temperaturkoeffizient von ≈ -0,19 ‰/°C. Die Varianz [R^2] zwischen Fraktionierung und Wassertemperatur beträgt dabei 0,842 (vgl. Abb. 44).

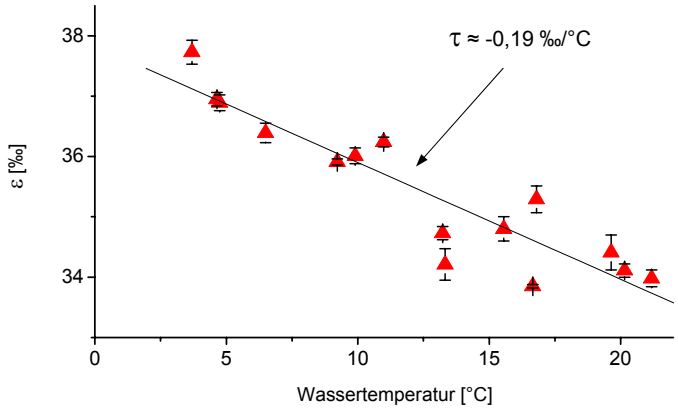


Abb. 44: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares; unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs ergibt sich ein Temperaturkoeffizient von $\tau \approx$ -0,19 ‰/°C ($\tau = \Delta\varepsilon/\Delta T$); Fehlerbalken = einfache Standardabweichung

Die in der Abbildung 44 dargestellten Ergebnisse stellen gewichtete Fraktionierungswerte der drei Größenklassen 20-80, 10-20 und 5-10 µm dar. Diese Gewichtung wurde notwendig, da die Masse der aus den drei Größenklassen der rezenten Sedimentproben separierten Diatomeenvalven unterschiedlich groß ist. Wenn jeweils eine ausreichend große Menge Opal abgetrennt werden konnte, wurde der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert für die einzelnen Größenklassen bestimmt und unter Berücksichtigung des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes die Fraktionierung für jede der drei Klassen berechnet. Anschließend erfolgte die Gewichtung der Fraktionierungswerte mit Hilfe der separierten Menge biogenen Opals (vgl. Tab. 19).

Tab. 19: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung beim Valvenaufbau rezenter Diatomeen des Holzmaares, aufgefangen in der 7-Meter-Falle; ε gibt die berechnete **gewichtete** Fraktionierung ($\approx \delta^{18}O_{SiO2} - \delta^{18}O_{H2O}$) an. Die Gewichtung erfolgte aufgrund der Menge des im jeweiligen Akkumulationszeitraum gewonnenen biogenen Opals.

Datum der Probenahme	2000			2001											2002
	12.09.	10.10.	07.11.	13.02.	13.03.	10.04.	08.05.	06.06.	03.07.	31.07.	28.08.	25.09.	23.10.	20.11.	06.02.
Größenfraktion	**ε [‰]**														
20-80 µm	33,8	35,2	36,2	37,6	37,0	*	36,3	34,5	35,0	34,2	35,7	33,9	34,8	35,9	36,8
10-20 µm	34,3	35,2	36,3	37,9	36,8	36,4	35,7	34,8	35,3	34,0	33,9	33,9	34,7	36,1	37,0
5-10 µm	33,9	34,9	36,2	37,5	37,0	36,6	35,7	34,7	35,4	34,2	34,1	33,8	35,2	**	**
Größenfraktion	**biogener Opal [mg]**														
20-80 µm	2,6	3,4	4,2	2,7	5,6	0,7	43,4	1,5	9,7	3,3	3,9	1,6	0,6	1,8	2,0
10-20 µm	4,1	8,2	11,0	15,9	21,7	7,5	45,4	17,7	25,9	10,0	8,3	14,0	2,5	3,0	18,3
5-10 µm	7,7	13,5	11,6	7,8	9,3	1,0	24,8	6,1	10,0	4,6	7,2	5,3	5,8		
	ε [‰] gewichtet														
7m-Falle	33,9	35,0	36,2	37,7	36,9	36,4	35,9	34,7	35,3	34,1	34,0	33,9	35,0	36,0	37,0

* Aufgrund der geringen Menge biogenen Opals war keine Messgaserzeugung möglich.
** Die Valven der 5-10 µm-Größenklasse wurden nicht aus dem Sediment separiert.

Die starke Saisonalität der Biomasseproduktion durch pelagische Süßwasserdiatomeen führt zu einer sich im Jahresverlauf ändernden Diatomeenakkumulationsrate (vgl. Abb. 45). Dabei führt die Massenvermehrung einzelner Taxa innerhalb der pelagischen Diatomeenvergesellschaftung oftmals zu erheblichen Mengenunterschieden in den drei Größenklassen, die aus den Sedimentproben separiert werden konnten (vgl. hierzu auch Tab. 21). Demzufolge wird die Ableitung einer Paläowassertemperatur aufgrund des $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wertes von fossilem biogenem Opal immer einen gewichteten Mittelwert der Paläowassertemperatur im jeweiligen Akkumulationszeitraum widerspiegeln.

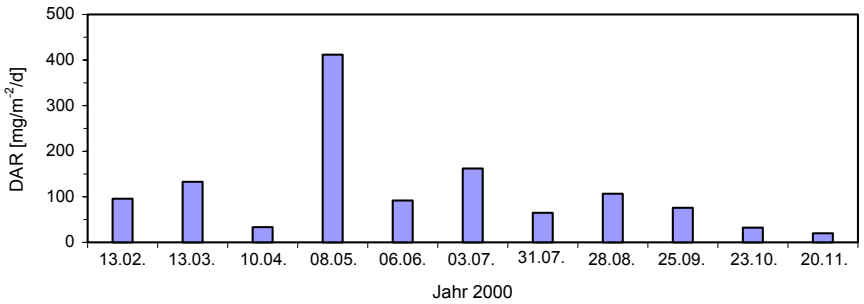


Abb. 45: Diatomeenakkumulationsrate (DAR) im Jahresverlauf 2001 im pelagialen Lebensraum des Holzmaares auf der Basis der Valvenseparation von Sedimentfallenmaterial aus der 7-Meter-Falle

Im Rahmen der hier vorliegenden Kalibrierungsstudie konnte erstmals die Temperaturabhängigkeit der Sauerstoffisotopenfraktionierung bei der Biomineralisation von Kieselalgenskeletten in einem rezenten Ökosystem nachgewiesen werden. Der ermittelte Temperaturkoeffizient von ≈ -0,19 ‰/°C für die Sauerstoffisotopenfraktionierung im pelagischen Lebensraum des Holzmaares stellt ein zentrales Ergebnis dieser Arbeit dar.

Die vorliegende Kalibrierungsstudie ergänzt bzw. konkretisiert daher die vier bisher veröffentlichten Arbeiten in einem erheblichem Umfang, in denen die Temperaturabhängigkeit bei der Sauerstoffisotopenfraktionierung von Kieselalgen theoretisch abgeleitet bzw. im Labor experimentell nachgewiesen wurde.

So schlug LABEYRIE 1974 in einer grundlegenden Arbeit erstmals einen Temperaturkoeffizienten von -0,25 ‰/°C für die Fraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal vor (vgl. Tab. 20 und Abb. 46). Den Koeffizienten berechnete der Autor jedoch lediglich aus zwei rezenten Proben von Süßwasserdiatomeen zweier unterschiedlicher europäischer Seen sowie aus einer rezenten Probe mariner Kieselalgen aus dem Golf von Kalifornien. Der jeweilige Quellwert der Isotopenfraktionierung, d.h. der im Zeitraum der Biomineralisation des Opals in den entsprechenden Gewässern herrschende $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert, stand LABEYRIE nicht zur Verfügung (LABEYRIE 1974).

JUILLET-LECLERC und LABEYRIE präsentierten 1987 einen Temperaturkoeffizienten von -0,29 ‰/°C, den die Autoren nach der Bestimmung von $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten des biogenen Opal aus 18 Sedimentkernproben ableiteten. Die Proben stammten aus dem nördlichen und äquatorialen Pazifik, dem Golf von Kalifornien und dem Südpazifik (vgl. Tab. 20 und Abb. 46). Alle Proben, aus denen der marine biogene Opal separiert wurde, stellten Mischproben akkumulierter Valven aus jeweils mehreren hundert Jahren dar. Zur Generierung des Temperaturkoeffizienten wurde den $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten der entsprechende aktuelle Mittelwerten der Oberflächenwassertemperatur der jeweiligen sechs Sommermonate gegenübergestellt. Der korrespondierende $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers wurde abgeschätzt (JUILLET-LECLERC & LABEYRIE 1987).

MATHENEY und KNAUTH (1989) ermittelten aus dem Vergleich von nur zwei marinen Proben einen Temperaturkoeffizienten von -0,48 ‰/°C, der deutlich über dem Koeffizienten von JUILLET-LECLERC und LABEYRIE (1987) liegt (vgl. Tab. 20 und Abb. 46). Bei dem hierbei verwendeten biogenen Opal handelte es sich um einen rezenten marinen Diatomeenschlamm von der Sedimentoberfläche des südlichen Nordostpazifiks sowie um einen miozänen Diatomit der Montery Formation aus Lompoc (Cape Conception, Südkalifornien). Für den Bildungszeitraum des Diatomeenschlamms wurden eine Oberflächenwassertemperatur von 7 °C und ein $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers von 0,0 ‰ angenommen. Für den miozänen Diatomit wurden ein $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers von -0,9 ‰ und eine Oberflächen-

wassertemperatur von 15 °C, die der heutigen Augusttemperatur vor der Küste des nunmehr landfesten Ortes der Probenahme entspricht, zugrunde gelegt. Wassertemperatur und $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers zum Zeitpunkt der Valvenbildung waren somit für keine der beiden Proben bekannt, so dass Fehler bei der Berechnung der Fraktionierung wahrscheinlich sind. Zudem ist die Wahl der aktuellen mittleren Wassertemperatur des Monats August fragwürdig, da sich die Vegetationsperiode im Nordpazifik zumindest von Mai bis Oktober erstreckt, wodurch eher mit einer niedrigeren Mitteltemperatur der gesamten Vegetationsperiode zu rechnen ist.

Tab. 20: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung (charakterisiert durch den Temperaturkoeffizienten τ) beim Valvenaufbau von Diatomeen nach verschiedenen Autoren

Autor/en der Studie	Probenmaterial	$\delta^{18}O_{H2O}$ [‰]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ [‰]	Temperaturbereich H_2O [°C]	$\delta^{18}O_{SiO2}$ Δ [‰]	**Temperaturkoeffizient τ [‰/°C]**
LABERYIE 1974	Rezente Proben; zwei lakustrine, eine marine Probe	0,6* -8,0*	35,8 31,7	25,0 ± 2 4,5 ± 2	5,1	≈ **-0,25**
JUILLET & LABERYIE 1987	Marine Proben aus verschiedenen Bohrkernen	-0,3* 0,2*	45,1 39,0	1,5 24,0	6,6	≈ **-0,29**
MATHENEY & KNAUTH 1989	Eine junge marine Schlammprobe sowie ein Diatomit	-0,9* 0,0*	42,7 39,6	7,0 15,0	2,2	≈ **-0,48**
BRANDRISS et al. 1998	Zwei Süßwasserarten aus Kulturexperimenten	-7,5+ -7,6+	28,7 25,5	3,6 20,0	3,1	≈ **-0,19**
Diese Arbeit	Rezente Diatomeen des Holzmaares	-8,2 -6,8	29,3 27,6	3,7 21,2	3,2	≈ **-0,19**

* Die $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte wurden geschätzt und nicht gemessen.
\+ In den Kulturversuchen von BRANDRISS et al. (1998) war der $\delta^{18}O_{H2O}$-Quellwert unabhängig von der Wassertemperatur immer konstant.

BRANDRISS et al. führten 1998 erstmalig kontrollierte Laboruntersuchungen mit Süßwasserdiatomeen durch. Dabei wurden die beiden Arten *Stephanodiscus niagarae* und *Aulacoseira subarctica* bei unterschiedlichen Wassertemperaturen in isotopisch unterschiedlich markierten Wässern kultiviert. Im Rahmen dieser Laborstudie wurden insgesamt zehn $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte bei konstanten Wassertemperaturen sowie bekannten konstanten $\delta^{18}O_{H2O}$-Werten des Wassers ermittelt. Damit konnte erstmals der Einfluss des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes, d.h. des Isotopenquellwertes auf die Fraktionierung der Diatomeen unter kontrollierten Bedingungen berücksichtigt werden (vgl. Tab. 20 und Abb. 46). BRANDRISS et al. (1998) berechneten aufgrund ihrer Ergebnisse einen Temperaturkoeffizienten von -0,19 ‰/°C. Der in der hier vorliegenden Arbeit ermittelte Temperaturkoeffizient stimmt mit dem von BRANDRISS et al. (1998) nahezu überein. Auch der Unterschied in der Fraktionierung beträgt lediglich ca. 1,0 ‰, während die berechneten Werte der früheren Studien um 3 bis 7 ‰ über den Ergebnissen der hier vorliegenden Arbeit liegen (vgl. Abb. 46).

Zur Berechnung des Temperaturkoeffizienten wird in der Kalibrierungsstudie im Holzmaar wie bei BRANDRISS et al. (1998) eine lineare Beziehung zwischen der Sauerstoffisotopenfraktionierung [ε] und der Wassertemperatur [T_{H2O}] über das gesamte ermittelte Temperaturintervall angenommen (vgl. Abb. 46 und Abb. 47).

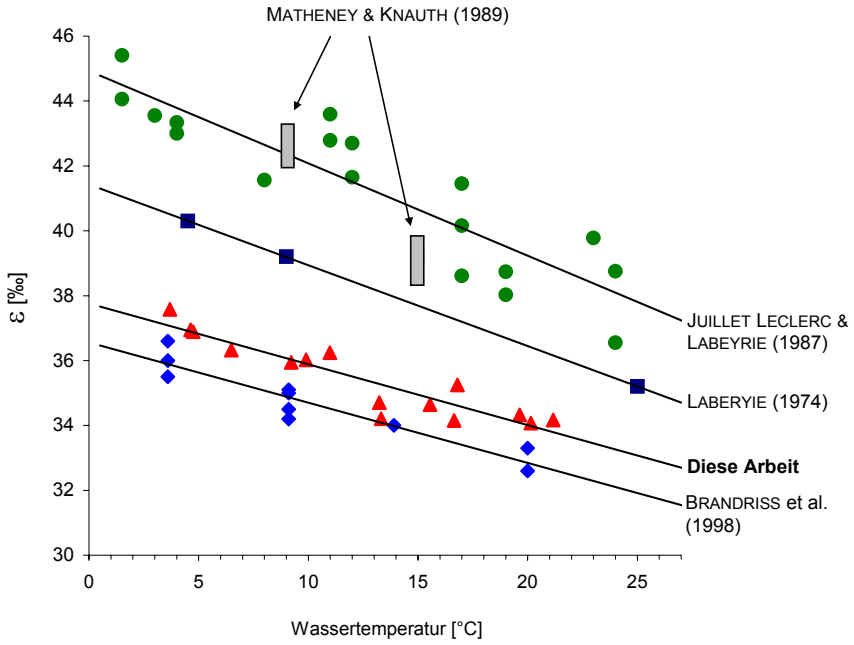


Abb. 46: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares im Vergleich zu Ergebnissen früherer Studien.

Neben den sich auffällig gleichenden Temperaturkoeffizienten der hier vorgestellten Kalibrierungsstudie und dem der Laborstudie besteht auch bei der Varianz [R^2] eine hervorragende Übereinstimmung. So beträgt die Varianz in der Beziehung zwischen Fraktionierung und Wassertemperatur im Holzmaar 0,842. Sie ist damit nur wenig geringer als die Varianz der Laborstudie. Dies ist umso erstaunlicher, als die Diatomeen der Laborstudie bei vier konstanten und bekannten Wassertemperaturen kultiviert wurden, während die hier vorliegende Kalibrierungsstudie in einem offenen lakustrinen Ökosystem durchgeführt wurde. Während in der Laborstudie vier Wassertemperaturen zur Ermittlung des Temperaturkoeffizienten genutzt wurden, stehen in der Kalibrierungsstudie im Holzmaar den einzelnen $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten des biogenen Opals 15 unterschiedliche Wassertemperaturwerte gegenüber. Außerdem ist die Anzahl der ermittelten $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte der Studie im Holzmaar insgesamt größer als diejenige des Laborexperimentes.

Sowohl der von BRANDRISS et al. (1998) berechnete Temperaturkoeffizient als auch der für den pelagischen Lebensraum des Holzmaares berechnete Koeffizient ist deutlich kleiner als der von JUILLET-LECLERC und LABEYRIE (1987) von -0,29 ‰/°C und vor allem als der von MATHENEY und KNAUTH (1989) veröffentlichte Koeffizient, der mit -0,48 ‰/°C angegeben wird. Es ergeben sich zudem Unterschiede hinsichtlich der Fraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal: Die im Rahmen der hier vorliegenden Kalibrierungsstudie berechnete Fraktionierung [$\varepsilon_{Opal\text{-}Wasser}$] ist um 3 bis 7 ‰ niedriger als die durch LABEYRIE (1974) sowie JUILLET-LECLERC und LABEYRIE (1987) berechnete.

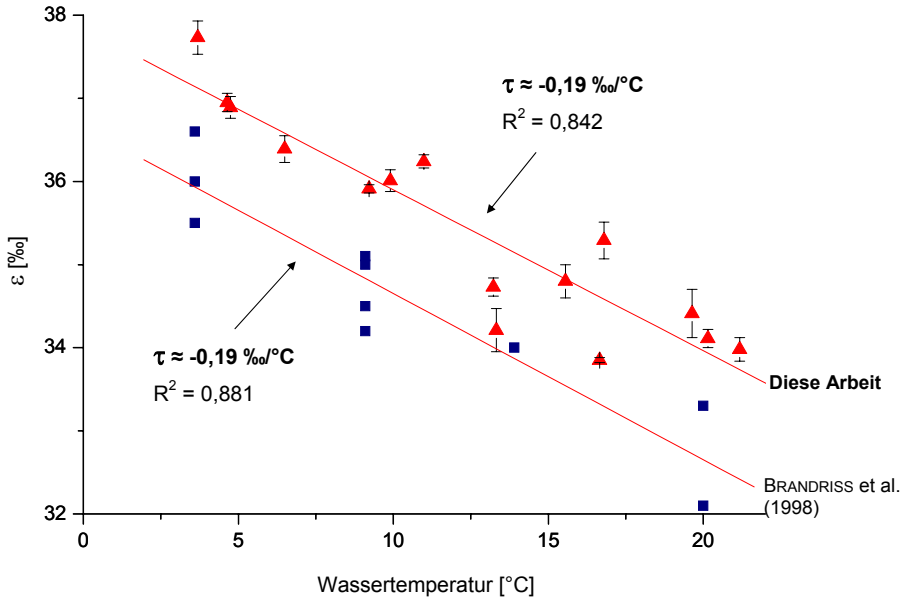


Abb. 47: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares (7-Meter-Falle) im Vergleich zu den Ergebnissen der Laborstudie von BRANDRISS et al. (1998). Fehlerbalken = einfache Standardabweichung

Eine wesentlich bessere Übereinstimmung besteht indes mit den von BRANDRISS et al. (1989) ermittelten Werten, die lediglich um ca. 1,0 ‰ niedriger ausfielen als die Ergebnisse dieser Studie. Damit lassen sich die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse gut mit dem Datensatz von BRANDRISS et al. (1998) vergleichen. Der Temperaturkoeffizient von ca. -0,19 ‰/°C liegt allerdings deutlich unter denjenigen, die in früheren Arbeiten abgeleitet wurden (vgl. Abb. 46).

Die aufgeführten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Kalibrierungsstudie im Holzmaar sowie der Ergebnisse von BRANDRISS et al. (1998) und den Ergebnissen der älteren Arbeiten lassen sich nicht allein dadurch erklären, dass letztere die isotopische Zusammensetzung des Wassers während des Algenwachstums nicht messen konnten. Aufgrund mangelnder Informationen bezüglich der Wassertemperatur und dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers im Zeitraum der Valvenbildung sind fehlerhafte Ableitungen der Fraktionierungswerte durchaus denkbar. Allerdings stimmen die Trends der Fraktionierung in Abhängigkeit von der Wassertemperatur bei den bisher veröffentlichten Ergebnissen durchaus mit den Ergebnissen der hier vorliegenden Kalibrierungsstudie überein.
Wahrscheinlicher ist es daher, dass die erhebliche Differenz des im Rahmen dieser Arbeit generierten Temperaturkoeffizienten resp. dem der Laborstudie (BRANDRISS et al. 1998) zu den Arbeiten mit theoretisch abgeleiteten Temperaturkoeffizienten durch unterschiedliche chemische Eigenschaften frischer und fossiler Diatomeenvalven hervorgerufen wird. BRANDRISS et al. (1998) beobachteten, dass bei der vollständigen Dehydrierung bereits lufttrockener rezenter Diatomeenvalven unter Vakuum bei einer Temperatur von ca. 1.050 °C weitere ca. 10 bis 15 % der Masse verloren gehen, wohingegen fossile Diatomite nur ca. 4 bis 5 % ihrer Masse verlieren. Die Menge der an- und eingelagerten Wassermoleküle sowie sauerstoffhaltiger Molekülgruppen (H_2O, OH, etc.) ist bei Valven frischer Diatomeen wahrscheinlich deutlich größer als der Wassergehalt fossiler Diatomite, was auf eine deutlich hydrophilere und reaktivere Oberfläche frischer Valven hindeutet. JUILLET (1980) beschrieb die obersten Lagen biogenen Opals frischer Diatomeenvalven als isotopisch ungewöhnlich leicht. Das Entfernen der obersten Schichten der Gerüstsubstanz durch Kochen in konzentrierter heißer Schwefelsäure führte bei zwei Proben frischer Valven zu einem Anstieg der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte um 1,8 und 5,3 ‰. Dagegen hatte die gleiche Behandlung keinen Effekt auf den biogenen Opal einer mehrere tausend Jahre alten marinen Probe (JUILLET 1980).

Ähnliche Effekte konnten auch im Rahmen der Methodenentwicklung zum Hochtemperatur-Aufschlussverfahren beobachtet werden. Durch die unterschiedlich starke thermische Vorbehandlung vor dem eigentlichen Aufschluss des biogenen Opals, was der „vollständigen Dehydrierung“ bei 1.050 °C von BRANDRISS et al. (1998) entspricht, konnte der Einfluss sauerstoffhaltiger, an den biogenen Opal angelagerter Stoffe auf den $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert beurteilt werden. Es zeigte sich, dass die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte frischer Valven der in einer Laborkultur im Institut für Sedimentäre Systeme (ICG-V) kultivierten Kieselalgenart *Fragialria crotonensis* bei einer ausschließlichen Vakuumtrocknung des Probenmaterials um ein vielfaches positiver ausfielen als bei einer Vorkonditioniertemperatur von ca. 1.030 °C. Dagegen unterschieden sich die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte eines fossilen Kieselgurs mit und ohne thermische Vorkonditionierung nur unwesentlich von einander (vgl. Abb. 14, Kap. 5.6).

Darüber hinaus besteht ein nicht zu unterschätzender zusätzlicher Unsicherheitsfaktor in den methodischen Schwierigkeiten bei den bisher gebräuchlichen chemischen Aufschlussverfahren, z.B. der schrittweisen Fluorinierung und des kontrollierten Isotopenaustausches zwischen biogenem Opal und heißem Wasserdampf (vgl. Kap. 5). Bei diesen Methoden ist ein Isotopenaustausch zwischen der zentralen Gerüstsubstanz und an dieser angelagerten Molekülen bzw. Molekülgruppen bei der Zersetzung des biogenen Opals zu CO_2 oder CO nicht völlig auszuschließen (CLAYTON et al. 1972, KNAUTH & EPSTEIN 1982). So fanden SCHMIDT et al. (1997) keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Sauerstoffisotopenfraktionierung frischer mariner Diatomeen aus Kulturen bzw. aus Sedimentfallen und den zugehörigen Wassertemperaturen einschließlich bekannter korrespondierender $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte des Wassers. Zur Messgaserzeugung nutzten die Autoren das Verfahren des kontrollierten Isotopenaustausches, bei dem die rezenten Valven vor der Fluorinierung ca. 180 °C heißem Wasserdampf unter hohem Druck ausgesetzt wurden (SCHMIDT et al. 1997 und Kap. 5). Möglicherweise führt diese Behandlung zu einem Sauerstoffisotopenaustausch zwischen dem heißen Dampf bzw. den an die Valven angelagerten sauerstoffhaltigen Gruppen und dem äußeren Schalenbereich der zentralen Gerüstsubstanz des biogenen Opals. Ein solcher Isotopenaustausch würde dann das in den frischen Valven gespeicherte originäre Temperatursignal überprägen.

12.3 Die Sauerstoffisotopenfraktionierung in Abhängigkeit von der Größenklasse der Diatomeenvalven

Mit den derzeit vorhandenen Methoden ist es nicht möglich, einzelne Diatomeentaxa aus Sedimenten zu separieren (RINGS 2002, RINGS et al. 2004). Um dennoch mögliche, bisher jedoch nicht untersuchte artspezifische Einflüsse auf die Isotopenfraktionierung von Süßwasserdiatomeen abzuschätzen, wurden die im Jahre 2000 aus der 7-Meter-Falle gewonnenen Diatomeenvalven in drei Größenklassen unterteilt. Auf diese Weise ist zwar keine Separation in speziesspezifische Proben möglich, jedoch führt die Aufteilung in drei Größenklassen zu einer starken Anreicherung unterschiedlich großer Gattungen in den einzelnen Teilproben (vgl. Tab. 21, Kap. 12.2). Dabei half der Umstand, dass die Separation der Valven mit Hilfe der SPLITT-Fraktionierung lediglich innerhalb relativ enger Partikelgrößengrenzen zu guten Trennergebnissen führt und alle in dieser Arbeit untersuchten rezenten Sedimente des Holzmaares vor der Diatomeenseparation in die drei Größenklassen 20-80, 10-20 und 5-10 µm getrennt werden mussten.

In der Abbildung 48 ist die Sauerstoffisotopenfraktionierung des im Holzmaar in sieben Metern Wassertiefe aufgefangenen biogenen Opals getrennt nach den drei separierten Größenklassen der Diatomeenvalven dargestellt. Werden dabei Temperaturgradienten für die verschiedenen Größenklassen berechnet, so ergibt sich ein differenzierteres Bild.

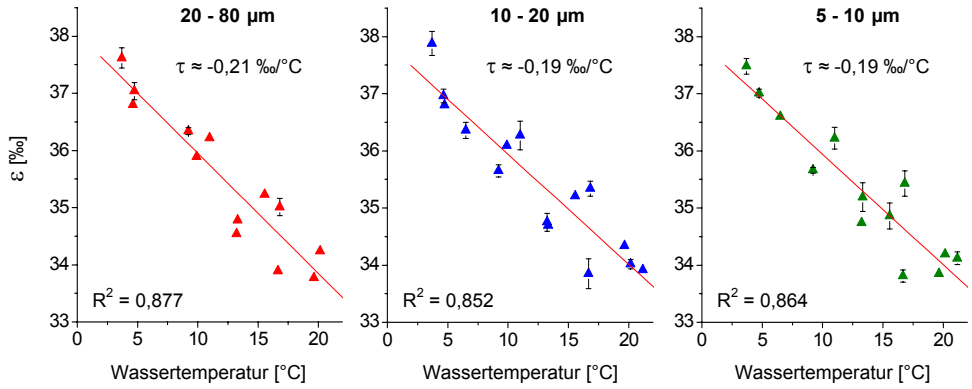


Abb. 48: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares in Abhängigkeit ihrer Größenklassen im Temperaturintervall zwischen 3 und 22°C; Trendlinien = lineare Regression; Fehlerbalken entsprechen einfacher Standardabweichung

Zunächst fallen die unterschiedlich hohen Temperaturkoeffizienten auf. Der Koeffizient der 20-80 µm-Größenklasse ist dabei mit ≈ -0,21 ‰/°C absolut gesehen geringfügig größer als diejenigen der 10-20 und 5-10 µm-Klasse, die mit ≈ -0,19 ‰/°C nahezu identisch sind. Die Varianzen unterscheiden sich zwischen den drei Größenklassen allerdings nicht signifikant. Sie entsprechen jeweils etwa der Varianz der in der Abbildung 44 dargestellten gewichteten Mittelwertfunktion der Fraktionierung. Eine größenklassenabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung beim Valvenaufbau von Süßwasserdiatomeen kann nicht festgestellt werden.

Bei einer Gegenüberstellung der Fraktionierungswerte mit den jeweils zugehörigen Wassertemperaturen fällt ein Zeitraum stark gegenläufiger Trend beider Kurvenverläufe auf. Allerdings fällt ein kurzer Zeitabschnitt im Sommer 2001 auf, in dem mit zunehmender Wassertemperatur eine gleichzeitig stärker werdende Sauerstoffisotopenfraktionierung der Diatomeen einher geht (vgl. Abb. 49). Aus physikalischer Sicht ist ein Anstieg der Fraktionierung bei gleichzeitig steigender Wassertemperatur nicht zu erwarten. Ein zeitweilig positiver Temperaturkoeffizient kann daher nicht auf die physiko-chemischen Effekte der Isotopenfraktionierung zurückgeführt werden, sondern muss physiologische und möglicherweise auch artspezifische Ursachen haben. Derartige Schwankungen könnten auf den

Einfluss abiotischer Faktoren wie Nährstoff- und Lichtverhältnisse oder den Einfluss biotischer Faktoren wie temperaturabhängige Wachstumsraten, Konkurrenz und Fraß durch Primärkonsumenten hindeuten, die den rein physiko-chemischen Effekt der Isotopenfraktionierung im Zeitraum hoher Wassertemperatur überlagern könnten.

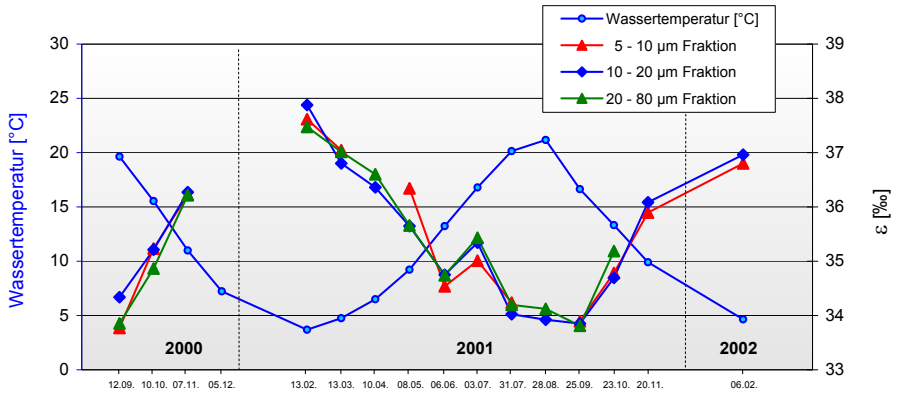


Abb. 49: Jahresgang der Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares und Verlauf der Wassertemperatur im Epilimnion

Bleiben die Fraktionierungswerte der Sommer- und frühen Herbstmonate mit erhöhten Wassertemperaturen bei der Berechnung des Temperaturkoeffizienten unberücksichtigt, so vergrößert sich der Temperaturkoeffizient auf ≈ -0,26 ‰/°C, mit einer Varianz von 0,805. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Temperaturkoeffizienten der drei Größenklassen bleiben jedoch ähnlich groß wie im Temperaturintervall zwischen 3 und 22 °C (vgl. Abb. 50).

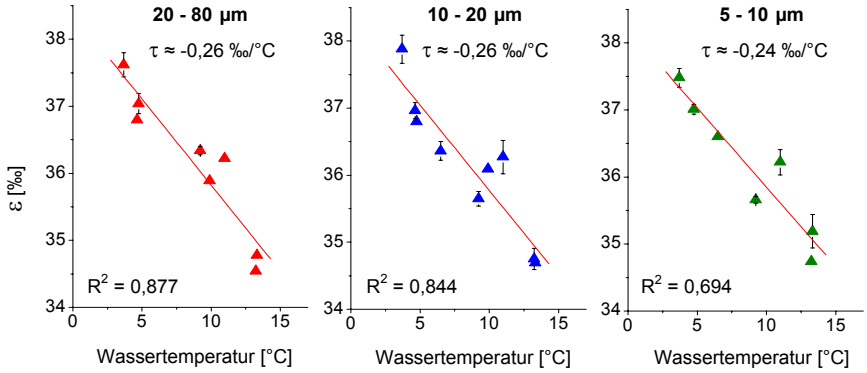


Abb. 50: Die temperaturabhängige Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares in Abhängigkeit ihrer Größenklasse im Temperaturintervall zwischen 3 und 14 °C. Trendlinien = lineare Regression; Fehlerbalken = einfache Standardabweichung

Beschränkt man den Temperaturbereich dagegen lediglich auf die in den Winter- und Frühjahrsmonaten (Dezember bis Anfang Mai) gemessenen Wassertemperaturen zwischen 3 und 10 °C (vgl. Tab. 17, Kap. 12.2), so steigt der Temperaturkoeffizient für die Beziehung zwischen der Isotopenfraktionierung und der Wassertemperatur nochmals bis auf einen Wert von ≈ -0,47 ‰/°C. Die erklärte Varianz liegt dann bei 0,881. Ein solcher, sehr hoher Koeffizient für das Temperaturintervall zwischen 3 und 10 °C stimmt auffallend mit dem von SHEMESH et al. (1992) vorgeschlagenen Temperaturkoeffizienten mariner Diatomeen in arktischen und subarktischen Gewässern überein. Diesen Koeffizienten leiten die Autoren aus den von JUILLET-LECLERC und LABEYRIE (1987) veröffentlichten Ergebnissen ab.
SHEMESH et al. (1992) bestimmten das Sauerstoffisotopenverhältnis von 31 Proben biogenen Opals mariner Diatomeen, die einen Zeitraum von ca. 80.000 Jahren abdecken und aus einem Sedimentkern entstammen der im Atlantischen Ozean südlich der Antarktischen Konvergenz erbohrt wurde. Zur Kalkulation der Ozeanwassertemperatur im Zeitraum des Algenwachstums wird ein Koeffizient von -0,47 ‰/°C angeben, den die Autoren aus einer Neuinterpretation des von JUILLET-LECLERC und LABEYRIE (1987) vorgeschlagenen Temperaturkoeffizienten errechneten. Wegen der zum heutigen Zeitpunkt im südlichen Atlantischen Ozean herrschenden niedrigen Wassertemperaturen verwendeten die Autoren zur Berechnung des Koeffizienten lediglich diejenigen $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals von LECLERC und LABEYRIE (1987), die bei Wassertemperaturen zwischen 1,5 und 8,0 °C biomineralisiert wurden. Als Folge dessen vergrößert sich der auch in der Abbildung 46 dieser Arbeit aufgeführte Koeffizient von -0,26 ‰/°C für das Temperaturintervall zwischen 1,5 und 24,0 °C auf -0,47 ‰/°C für ein Intervall zwischen 1,5 und 8,0 °C.

Bezogen auf das Holzmaar erscheint die Nichtberücksichtigung der Fraktionierungswerte der Sommer- und frühen Herbstmonate zur Berechnung des Temperaturkoeffizienten aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse als wenig sinnvoll. Im rezenten Ökosystem des Sees wird in der wärmeren Jahreszeit zwischen Juni und September ein nicht unerheblicher Teil des biogenen Opals produziert (vgl. Tab. 19 und Abb. 45). Dieser Opal sinkt nach dem Absterben der Diatomeen in das Profundal des Sees und wird in das Sediment eingearbeitet. Blieben die Fraktionierungswerte der Sommer- und frühen Herbstmonate bei der Berechnung eines Temperaturkoeffizienten, der als Grundlage für eine Transferbeziehung zwischen fossilem biogenem Opal und der Paläowassertemperatur dienen soll, unberücksichtigt, so vergrößerte sich zwar der Koeffizient für die Abhängigkeit zwischen Temperatur und Fraktionierung. Eine solche Vorgehensweise impliziert jedoch, dass in der Vergangenheit während der wärmeren Jahreszeit nahezu kein Opal gebildet wurde, wovon aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit nicht ausgegangen werden kann.

Die getrennte Darstellung der Fraktionierungswerte der drei Größenklassen weist auf ein noch nicht beachtetes Phänomen hin: Zur Berechnung der bisher veröffentlichten Temperaturkoeffizienten für die Sauerstoffisotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal wurde jeweils eine lineare Beziehung zwischen der Fraktionierung und der Wassertemperatur im Zeitraum des Algenwachstums angenommen (JUILLET-LECLERC & LABEYRIE 1987, MATHENEY & KNAUTH 1989, BRANDRISS et al. 1998). Bei einer differenzierten Betrachtung der im Rahmen der hier vorliegenden Kalibrierungsstudie ermittelten Fraktionierungswerte vor allem der 20-80 µm-Größenklasse zeichnet sich dagegen ab, dass die Fraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal mit einer Zunahme der Wassertemperatur schwächer bzw. die Variabilität der Fraktionierungswerte erheblich größer wird (vgl. Abb. 48). Dies deutet auf eine nichtlineare Beziehung zwischen der Sauerstoffisotopenfraktionierung und der Wassertemperatur hin, für die verschiedene Gründe denkbar sind:
Der Einfluss biotischer Faktoren wie der Konkurrenz zwischen einzelnen Diatomeenarten bzw. zwischen den Diatomeen und weiteren, im Gewässer vorkommenden Algengattungen, könnte den rein physiko-chemischen Effekt der Isotopenfraktionierung bei höheren Wassertemperaturen überlagern. Auch ein möglicher artenspezifischer Fraß durch Primärkonsumenten ist nicht auszuschließen. Darüber hinaus ist bei höheren Wassertemperaturen eine größere Wachstumsrate der Diatomeen anzunehmen. Ist diese sehr groß, besteht die Möglichkeit, dass aufgrund eines sehr raschen Valvenaufbaus kein Isotopenaustauschgleichgewicht zwischen Wasser und biogenem Opal erreicht werden kann. Daraus würde automatisch eine geringere Fraktionierung resultieren. Auch ein Einfluss abiotischer Faktoren wie Nährstoff- oder Lichtversorgung der Diatomeenpopulation ist denkbar. So wird z.B. der Siliziumpool im Epilimnion des Sees aufgrund der Zehrung der gelösten Kieselsäure durch die Diatomeen im Frühjahr sehr rasch kleiner (vgl. Abb. 33, Kap. 8.1). Diese Überlegungen implizieren, dass zwischen der Sauerstoffisotopenfraktionierung der im Epilimnion des Holzmaares aufwachsenden Diatomeen und der Wassertemperatur im Zeitraum der Biomineralisation des biogenen Opals eine nichtlineare Beziehung bestehen könnte. Damit müsste für die Sauerstoffisotopenverhältnisse von fossilem biogenem Opal aus lakustrinen Sedimenten im Rahmen einer Klimarekonstruktion ebenfalls eine nichtlineare Beziehung zwischen Fraktionierung und Wassertemperatur herangezogen werden.

Um eine mögliche Nichtlinearität zwischen der Isotopenfraktionierung der Wassertemperatur im Zeitraum des Algenwachstums zu erkennen, bietet sich die Möglichkeit, eine nichtlineare Regressionsuntersuchung durchzuführen. Unterscheiden sich die Korrelationskoeffizienten oder die erklärten Varianzen der beiden Steigungen signifikant voneinander, so muss von einer nichtlinearen Beziehung zwischen der Isotopenfraktionierung und der Wasser-

temperatur im Zeitraum des Algenwachstums ausgegangen werden. Wäre dies der Fall, so müsste dies auch bei der Interpretation der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte von fossilem biogenem Opal aus lakustrinen Sedimenten berücksichtigt werden. In der Abbildung 51 ist die Varianz der Steigung sowohl durch eine lineare Regression als auch durch eine nichtlineare, polynomische Anpassung zweiter Ordnung zwischen Fraktionierung und Wassertemperatur dargestellt. Die geringfügig höhere Varianz, die aufgrund der nichtlinearen, polynomischen Anpassung bei allen drei Größenklassen erreicht wird resultiert dabei vor allem aus der starken Variation der sommerlichen Fraktionierungswerte in den drei Größenklassen (vgl. auch Abb. 49).

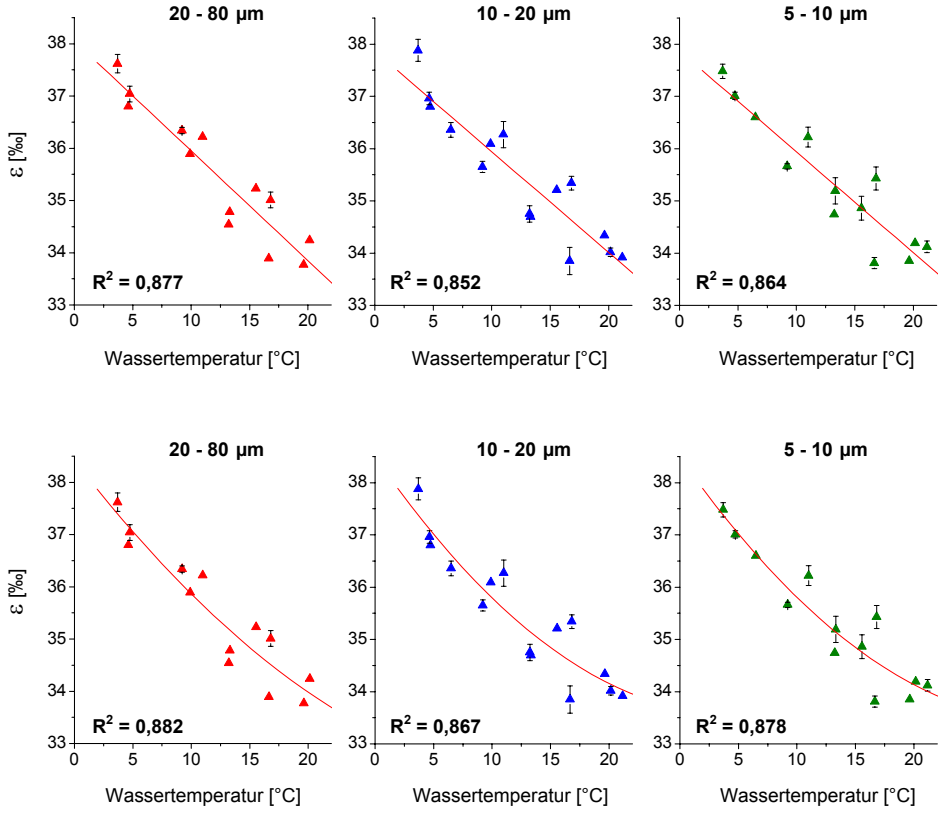


Abb. 51: Die Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen des Holzmaares in Abhängigkeit von ihrer Größenklasse im Temperaturintervall zwischen 3 und 22 °C; Trendlinien in der oberen Reihe basieren auf einer linearen Regression; Trendlinien in der unteren Reihe basieren auf einer polynomischen Regression zweiter Ordnung

Möglicherweise ist die zeitliche Auflösung des 28tägigen Valvenakkumulationszeitraumes innerhalb der Monate mit relativ hoher Wassertemperatur zu gering. Zeitweilig stark erhöhte Wachstumsraten der Diatomeen, die als Diatomeenblüten bezeichnet werden, führen zu kurzzeitigen Massenvermehrungen der Algen, die teilweise nur wenige Tage andauern (SCHWOERBEL 1993, WETZEL 2001). Eine solche, kurzzeitige Algenblüte führt in Seen zur Aufzehrung der im Gewässer gelösten Kieselsäure, was wiederum zum Ende der Massenvermehrung der Diatomeen führt. Tritt beispielsweise eine Algenblüte mit anschließender starker Reduktion der Individuenzahl zu Beginn eines 28tägigen Akkumulationszeitraumes auf, so repräsentiert der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert des biogenen Opals lediglich einen kurzen Zeitraum des 28tägigen Akkumulationszeitraumes. Diesem wird zur Berechnung der Fraktionierung jedoch der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers sowie die Wassertemperatur des gesamten Akkumulationszeitraumes gegenübergestellt. Ein weiterer Anstieg von Wassertemperatur und $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert innerhalb der 28 Tage bliebe dabei unberücksichtigt. Durch die Verkürzung des Akkumulationszeitraumes auf z.B. 14 Tage böte sich die Möglichkeit, die Fraktionierung für deutlich kürzere Zeiträume zu berechnen. Auch die zugehörige Wassertemperatur sowie der entsprechende $\delta^{18}O$-Wert des Wassers könnten auf diese Weise besser eingegrenzt werden. Dies insbesondere während der Sommermonate, in denen aufgrund der erhöhten Wassertemperatur mit einer sehr starken Populationsdynamik innerhalb unterschiedlicher Diatomeentaxa zu rechnen ist. Eine nichtlineare Beziehung zwischen der Fraktionierung und der Wassertemperatur im Zeitraum des Algenwachstums lässt sich aufgrund der Unterschiede, die sich bei linearer bzw. nichtlinearer Anpassung der Steigung ergeben, nicht ableiten. Dies vor allem daher, weil die höheren Varianzen der nichtlinearen Anpassungen vornehmlich auf die starken Variationen der Fraktionierungswerte des Sommers 2001 zurückzuführen sind. Innerhalb dieses Zeitraumes wurde im Holzmaar jedoch nur relativ wenig biogener Opal gebildet (vgl. Abb. 45).

Um mögliche artspezifische Fraktionierungseffekte genauer untersuchen zu können, wurden diejenigen Proben biogenen Opals, die am 12. September, 10. Oktober und am 07. November 2000 gewonnen und in die drei Größenklassen unterteilt wurden, taxonomisch untersucht. Dabei konnten insgesamt 59 Diatomeenarten aus 19 Gattungen bestimmt werden (vgl. Tab. 21). Die taxonomische Untersuchung erfolgte in den sog. A-Fraktionen der SPLITT-Fraktionierung, d.h. an dem Material, dass zur Bestimmung der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals verwendet wurde (vgl. Kap. 4.3). Durch die Zuordnung von jeweils 1.000 Valven einer Probe zu den in den A-Fraktionen enthaltenen Taxa wurde ferner deren prozentualer Anteil in den jeweiligen Größenklassen abgeschätzt.
Die in der Tabelle 21 zusammengestellten Ergebnisse der taxonomischen Untersuchungen verdeutlichen, dass der überwiegende Massenanteil in den einzelnen Größenklassen von

wenigen Arten dominiert wird. Dabei fällt z.B. der große Anteil von *Cocconeis placentula* auf, der in allen neun untersuchten A-Fraktionen vorkommt und der seinen Schwerpunkt in der 20-80 µm-Größenklasse besitzt, wo er 36 bis 47 % der Masse an biogenem Opal ausmacht. Daneben haben einzelne Arten einen großen Anteil an einer Größenklasse, während sie in den übrigen Größenklassen sehr rar sind oder ganz fehlen. Der Vergleich des Massenanteils einzelner Arten innerhalb der unterschiedlichen Größenklassen mit den jeweils ermittelten Fraktionierungswerten deutet dabei nicht auf artspezifische Fraktionierungseffekte hin. So beträgt z.B. der prozentuale Anteil von *Cyclotella bodanica* in der A-Fraktion der 20-80 µm-Größenklasse vom 07.11.2000 ca. 26 %, während der Anteil dieser Art in der A-Fraktion der 10-20 µm-Klasse lediglich ca. 0,3 % beträgt und in der 5-10 µm-Klasse völlig fehlt. Die für die einzelnen Größenklassen berechneten $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals unterscheiden sich jedoch nicht wesentlich.

Auch der hohe Anteil von *Cymbella minuta* in der A-Fraktion der 5-10 µm-Größenklasse der Proben vom 10.10. und 07.11.2000 hat keinen Einfluss auf das Isotopensignal des biogenen Opals. Während in der A-Fraktion der 5-10 µm-Klasse *Cymbella minuta*-Massenanteile von 34 bzw. 21 % festgestellt wurden, fehlt die Art in der A-Fraktion der 10-20 µm-Klasse. Das Isotopensignal des biogenen Opals beider Größenklassen ist jedoch wiederum nahezu identisch (vgl. Tab. 17 und Tab. 21).

Gegen eine artspezifische Fraktionierung spricht außerdem der unterschiedlich große Anteil der Zysten von *Dynobryon sociale* in den A-Fraktionen der 10-20 µm-Größenklasse aller Proben. Bei diesen Zysten handelt es sich um Überdauerungsknospen einer zu den Goldalgen (*Crysophyceae*) zählenden Art, die eine Schale aus biogenem Opal besitzen, welche die Goldalgen ebenso wie die Diatomeen aus dem Wasserkörper biomineralisieren. Artspezifische Fraktionierungseffekte sollten daher vor allem zwischen den A-Fraktionen der drei Größenklassen der Probe vom 07.11.2000 auftreten, da der Anteil von *Dinobryon sociale* Zysten in der A-Fraktion der 10-20 µm-Größenklasse dieser Probe 36 % beträgt, während die Zysten in den A-Fraktionen der beiden anderen Größenklassen fehlen. Die Sauerstoffisotopensignale des biogenen Opals aller drei Größenklassen sind jedoch wiederum nahezu identisch (vgl. Tab. 17, Kap. 12.2 und Tab. 21).

Die unterschiedlichen $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte der Probe vom 10.10.2000 deuten ebenfalls nicht auf eine artspezifische Isotopenfraktionierung hin. Die A-Fraktion der 5-10 µm-Größenklasse dieser Probe konnte trotz einer Vielzahl von Durchläufen durch die SPLITT-Zelle nicht vollständig von Mineralen befreit werden. Ein um ca. 1,0 ‰ niedrigerer $\delta^{18}O$-Wert dieser „kritischen“ Größenklasse gegenüber dem Niveau der A-Fraktionen der 10-20 und 20-80 µm-Größenklassen deutet nicht auf eine artspezifische Isotopenfraktionierung, sondern vielmehr auf den Einfluss relativ niedriger $\delta^{18}O$-Werte akzessorischer Minerale hin.

Tab. 21: Prozentualer Anteil der vorkommenden Diatomeentaxa in den aus der 7-Meter-Falle gewonnenen Proben des Jahres 2000; farblich gekennzeichnete Taxa und zugehörige Werte symbolisieren jeweils die z.T. erheblichen Anteile einzelner Spezies an der Gesamtmasse der einzelnen Proben.

Akkumulationszeitraum	**15.08. - 12.09.2000**			**12.09. - 10.10.2000**			**10.10. - 07.11.2000**		
Valvengrößen [µm]	**20 - 80**	**10 - 20**	**5 - 10**	**20 - 80**	**10 - 20**	**5 - 10**	**20 - 80**	**10 - 20**	**5 - 10**
Taxa									
Amphora ovalis Kütz.	0,9	.	.	0,3	.	.	.	.	.
Aulacoseira ambigua (Grun.) Simonsen	.	.	.	.	.	3,7	.	.	.
Caloneis amphisbaena (Bory) Cleve	.	.	.	.	1,3	.	.	.	.
Caloneis silicula (Ehrenberg) Cleve	.	.	.	.	1,0	0,3	.	3,7	.
Cocconeis pediculus Ehr.	0,9	0,6	.	4,0	.	0,6	0,4	1,1	.
Cocconeis placentula Ehr.	**46,5**	**24,3**	**7,1**	**43,4**	**41,0**	**7,5**	**36,3**	**24,3**	**32,1**
Cyclotella bodanica *var. affinis* (Grun.) Cleve	**2,7**	.	.	**2,4**	.	.	**26,3**	0,3	.
Cyclotella comensis Grun.	.	2,4	**29,0**	.	6,6	**12,9**	.	0,5	**24,9**
Cyclotella radiosa (Grun.) Lemm.	1,8	1,2	0,7	.	.	2,6	9,1	4,5	.
Cymatopleura elliptica Van Heurck	.	.	.	1,0	.	.	2,1	.	.
Cymatopleura solea (Breb.) W. Smith	4,0	.	.	2,7	.	.	2,9	.	.
Cymbella affinis Kützing	2,3	6,6	1,0	3,0	4,4	0,3	.	2,1	1,9
Cymbella caespitosa (Kütz.) Brun	2,7	.	.	.	.	.	.	.	.
Cymbella cistula (Ehr.) Kirchner	.	**9,5**	.	.	**17,6**	.	.	**14,0**	.
Cymbella cuspidata Kütz.	.	.	.	.	0,6	.	.	.	.
Cymbella helvetica Kützing	0,7	.	.	.	1,6	.	.	.	.
Cymbella lanceolata (Ehr.) Kirchner	3,6	0,4	.	2,4	.	.	2,9	3,2	.
Cymbella minuta Hilse ex Rabenhorst	1,8	**32,3**	**34,0**	.	.	**33,8**	.	.	**20,7**
Cymbella sinuata Gregory var. *sinuata*	.	.	4,2	.	.	.	.	.	0,8
Diatoma tenius Agardh	.	.	.	.	.	0,3	.	.	.
Diploneis elliptica (Kutz.) Cleve	.	0,2	.	.	0,3	.	.	0,5	.
Diploneis oculata (Breb.) Cleve	.	.	0,3	.	.	.	.	.	1,1
Epithemia adnata (Kütz.) Breb.	0,9	0,6	.	.	1,3	.	.	1,3	.
Epithemia sorex Kütz. var. *sorex*	.	.	.	.	.	.	.	0,3	.
Epithemia turgida var. *wastermanii* (Ehr.) Gru.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Eunotia bilunaris (Ehr.) Mills	.	.	.	.	.	0,6	.	.	.
Eunotia soleirolii (Kütz.) Rabenh.	.	.	.	.	.	.	.	0,5	.
Fragilaria brevistriata Grunow	.	.	**9,7**	.	**9,8**	**11,2**	.	.	**6,1**
Fragilaria capucina Desmazieres var. *capucina*	.	.	.	.	.	1,2	.	.	.
Fragilaria crotonensis Kitton	.	.	0,3	.	.	0,9	.	.	.
Fragilaria exigua Grun.	.	.	.	.	.	1,4	.	.	.
Fragilaria parasitica var. *subconstricta* Grun.	.	.	0,4	.	.	0,6	.	.	1,3
Fragilaria pseudoconstruens Marciniak	.	.	**3,6**	.	.	**11,7**	.	0,8	1,6
Fragilaria ulna (Nitzsch) Lange - Bertalot	.	.	.	.	0,3	0,3	.	.	.
Fragilaria ulna var. *angustissima* Sippen	0,9	1,0	.	1,2	0,6	0,9	1,7	0,5	0,3
Gomphonema acuminatum Ehr.	.	.	.	.	1,0	0,6	.	.	.
Gomphonema acuminatum W. Smith	.	.	.	.	.	0,6	.	.	0,8
Gomphonema augur Ehr. var. *augur*	.	.	.	.	.	.	.	0,5	.
Gomphonema olivaceum (Horn.) Breb.	.	.	1,0	.	.	0,6	.	.	3,2
Gomphonema truncatum Ehr.	0,9	1,8	4,9	.	1,3	1,4	.	4,5	4,8
Gyrosigma acuminatum (Kütz.) Rabenh.	**14,6**	.	.	**15,4**	.	.	**6,6**	.	.
Gyrosigma attenuatum (Kütz.) Rabenh.	3,6	.	.	6,4	.	.	1,7	.	.
Navicula cari Ehr.	.	.	0,7	.	.	.	.	.	.
Navicula minima Grun.	.	.	0,3	.	.	.	.	.	.
Navicula placentula (Ehr.) Grunow	.	.	.	.	0,3	.	.	.	.
Navicula radiosa Kütz.	.	0,5	0,7	0,3	0,3	4,0	.	0,5	0,3
Neidium bisulcatum (Lagerh.) Cleve	.	.	.	.	.	0,3	.	0,5	.
Nitzschia recta Hantzsch	.	.	1,4	.	0,3	1,0	.	.	0,3
Nitzschia sigmoidea (Nitzsch) W. Smith	0,9	0,8	0,7	3,0	0,3	.	1,7	.	.
Pinnularia mesolepta (Ehr.) W. Smith	.	.	.	0,3	.	.	.	.	.
Pinnularia nobilis (Ehr.) Ehr.	1,8	.	.	0,7	.	.	1,3	.	.
Pinnularia rupestris Hantzsch	.	.	.	1,0	.	.	1,7	.	.
Rhopalodia gibba (Ehr.) O. Müller var. *gibba*	.	.	.	.	.	0,6	.	.	.
Stauroneis anceps Ehr.	.	.	.	.	.	.	0,2	.	.
Surirella angusta Kütz.	**3,7**	1,0	.	**6,7**	0,3	.	0,4	0,5	.
Surirella biseriata Breb.	**4,6**	2,3	.	**3,7**	.	.	**4,9**	.	.
Surirella capronii Breb.	.	.	.	2,0	.	.	.	.	.
Tabellaria flocullosa Kützing	.	.	.	.	.	0,5	.	.	.
Zysten von ***Dinobryon sociale*** Ehr.	.	**14,5**	.	.	**9,8**	.	.	**35,9**	.
Summe	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

Aufgrund der im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit erzeugten $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals, getrennt in die beschriebenen drei Größenklassen und den Ergebnissen der taxonomischen Untersuchungen der im Jahre 2000 gewonnenen Diatomeen, lässt sich eine artspezifische Isotopenfraktionierung der Süßwasserdiatomeen im pelagischen Lebensraum des Holzmaares nicht nachweisen. Auch für einen nichtlinearen Trend bei der Isotopenfraktionierung gibt es keine ausreichenden Hinweise. Vielmehr deuten die Ergebnisse dieser Kalibrierungsstudie auf einen geringen Einfluss biotischer und/oder abiotischer Faktoren hin, die den physiko-chemischen Effekt der Isotopenfraktionierung bei höheren Wassertemperaturen in dem offenen lakustrinen Ökosystem des Holzmaares überlagern. Um mögliche artabhängige Fraktionierungseffekte endgültig klären zu können, sind weitere taxonomische Untersuchungen an Diatomeen aus rezenten Sedimenten zwingend erforderlich.

12.4 Speicherung des Temperatursignals

Die Valven frischer Diatomeen scheinen aufgrund vermuteter reaktiver Oberflächen sehr viel anfälliger für einen Sauerstoffisotopenaustausch zu sein, als dies bei fossilem biogenem Opal der Fall ist (SCHMIDT et al. 1997 und 2001). Zudem können partielle Valvenauflösungen und frühdiagenetische Prozesse die Oberflächen der Valven auf submikroskopischer Ebene derart modifizieren, dass die Anfälligkeit für einen raschen Isotopenaustausch bei zunehmender Alterung der Valven verloren geht. Hinweise auf derartige Alterungseffekte liefern z.B. die von JUILLET-LECLERC und LABEYRIE (1987) bzw. MATHENEY und KNAUT (1989) theoretisch bestimmten Koeffizienten für die Isotopenfraktionierung, die um 5 bis 7 ‰ positiver ausfallen als die im Rahmen dieser Kalibrierungsstudie berechnete Fraktionierung.

Aufgrund solcher Effekte ist nicht auszuschließen, dass die Alterung von fossilem biogenen Opal nach dessen Sedimentation und Einarbeitung in ein lakustrines Sediment zu einer systematischen ^{18}O-Anreicherung führt. Die Lösung instabiler und isotopisch leichter oberflächlicher Schichten der zentralen Gerüstsubstanz des Opals reduziert dabei möglicherweise auch das Oberflächen-Volumen-Verhältnis der Valven (KAMATANI 1971). Derartige An- bzw. Abreicherungen des schwereren ^{18}O-Isotops infolge des Absinkens der Kieselalgen im Gewässer sowie ihrer Ablagerung an der Sedimentoberfläche bzw. Einlagerung in das Sediment wurden bisher nicht untersucht.

Bezogen auf das lakustrine Milieu des Holzmaares kann nicht ausgeschlossen werden, dass bereits während der Sedimentation der Valven in das Profundal des Sees modifizierende frühdiagenetische Prozesse einsetzen, die das im oberen Epilimnion des Sees als Sauerstoffisotopenverhältnis im biogenen Opal der Valven gespeicherte Temperatursignal überprägen. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurden im Holzmaar neben den Diatomeen aus der Sedimentfalle in sieben Metern Wassertiefe zusätzlich Kieselalgen in

einer zweiten, wesentlich größeren Tiefe gewonnen. Ein systematischer Unterschied der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte von in größerer Wassertiefe aufgefangenen Valven im Gegensatz zu den aus der 7-Meter-Falle separierten Valven sollte erste Hinweise auf eine mögliche alterungsbedingte ^{18}O-Anreicherung im biogenen Opal geben.

In der Vegetationsperiode 2001 und zu Beginn des Jahres 2002 wurde zusätzlich zu den Proben aus sieben Metern Wassertiefe Material in einer Tiefe von 16 Metern in einer Sedimentfalle aufgefangen. Diese wurde ebenso wie die 7-Meter-Falle in einem 28tägigen Rhythmus geleert. Bei einem Vergleich der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte aus den beiden Gewinnungstiefen stellt der aus der 7-Meter-Falle separierte biogene Opal die Summe der im Epilimnion des Sees aufgewachsenen Diatomeen dar (vgl. Kap. 12.2). Obwohl es mit Hilfe taxonomischer Untersuchungen an frischen Kieselalgen bereits nach wenigen Stunden nicht mehr möglich ist, lebende Zellen von abgestorbenen zu unterscheiden, wird hier davon ausgegangen, dass in der 7-Meter-Falle vorwiegend lebendige oder kürzlich abgestorbene Diatomeen akkumulieren, da nur bis in eine Wassertiefe von ca. sechs bis maximal sieben Metern eine ausreichend große Lichtmenge für die Photosynthese eindingt. Die aus der 16-Meter-Falle separierten Valven stellen dagegen die Summe aller Skelette abgestorbener Individuen dar, die in das Profundal des Sees abgesunken sind und die in das Sediment eingelagert werden (vgl. Kap. 7.3 und 8.1). Wie aus der Abbildung 52 hervorgeht, kommt es als Folge der Sedimentation der Valven in das Profundal des Sees zu einer Erhöhung des originär im biogenen Opal gespeicherten $\delta^{18}O_{SiO2}$-Signals (vgl. auch Tab. 17).

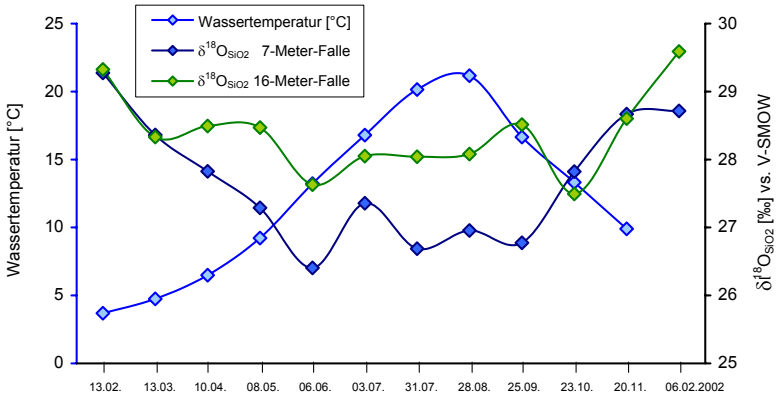


Abb. 52: $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals rezenter Diatomeen des Holzmaares aus Sedimentfallenmaterial der Jahre 2001 und 2002 aus zwei unterschiedlichen Gewinnungstiefen; die Wassertemperatur im Lebensraum der Algen ist zum Vergleich mit aufgeführt

Dabei sind die Differenzen der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte der Valven aus den beiden unterschiedlichen Gewinnungstiefen nicht über den gesamten untersuchten Zeitraum gleich groß. Vielmehr gleichen sich die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals aus den beiden Gewinnungstiefen in den Jahreszeiten mit niedriger Wassertemperatur, wohingegen die $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des Opals aus der 16-Meter-Falle in den Frühjahrs- und Sommermonaten um durchschnittlich 1,4 ‰ über denjenigen aus der 7-Meter-Falle liegen. Für die Dämpfung des Sauerstoffisotopensignals durch die Sedimentation der Diatomeenvalven in das Profundal und zur Sedimentoberfläche des Holzmaares sind drei unterschiedliche Gründe vorstellbar:

Grundsätzlich muss von der Annahme ausgegangen werden, dass die in eine Tiefe von mehr als sieben Metern abgesunkenen Diatomeen aufgrund des hier fehlenden Sonnenlichtes für die Photosynthese bereits abgestorben sind. Während der Sedimentation der Valven zum Gewässergrund könnte demnach ein Isotopenaustausch zwischen dem Sauerstoff der obersten Schichten des biogenen Opals abgestorbener Valven und dem, gegenüber dem Wasser des Epilimnions, ^{18}O-reicheren Wasser des Hypolimnions stattfinden. Die Folge wären höhere $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte derjenigen Valven, die in 16 Metern Wassertiefe aufgefangen wurden.

Nicht auszuschließen ist zudem, dass bei der Sedimentation der Valven zum Gewässergrund geringe Mengen des biogenen Opals gelöst werden. Im Untersuchungszeitraum wurden in der Zeit zwischen Mai und Oktober jeweils stark erhöhte pH-Werte in einer Wassertiefe zwischen sechs und acht Metern festgestellt, wobei in den Sommermonaten maximale Werte von mehr als pH 10,0 auftraten, die zu einer Anlösung der obersten Schichten führen müssen. Die stark erhöhten pH-Werte lassen sich durch den Entzug von Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) infolge der sehr hohen Photosyntheseleistung von *Planktothrix rubescens* in einer Wassertiefe zwischen vier und sechs Metern erklären (vgl. Kap. 7.2 und 7.4). Da sich die Löslichkeit von biogenem SiO_2 mit zunehmendem pH-Wert verstärkt und bei der Lösung von biogenem Opal Isotopeneffekte anzunehmen sind, könnte das langsame Absinken der Valven abgestorbener Diatomeen durch einen Bereich des Wasserkörpers mit stark erhöhtem pH-Wert durchaus zu einer ^{18}O-Veränderung zu erhöhten Werten im biogenen Opal führen.

Andererseits besteht die Möglichkeit, dass die Diatomeen erst zu einem späteren Zeitpunkt absterben als angenommen und beim Absinken in das Profundal und zum Gewässergrund weiterhin biogener Opal gebildet wird. Während des Sinkprozesses könnte ein weiterer Valvenzuwachs bei sinkender Wassertemperatur und gleichzeitig absinkendem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert zu höheren Isotopenfraktionierungen führen. Die Folge eines Valvenaufbaus in größerer Wassertiefe wäre dann eine dünne äußere Schicht biogenen Opals mit deutlich höherem $\delta^{18}O_{SiO2}$-Wert. So beträgt die Wassertemperatur in zehn Metern Tiefe noch Ende September

lediglich ca. 7 bis 8 °C. Gleichzeitig liegt der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers hier bei ca. -7,9 bis -8,2 ‰ (vgl. Kap. 9.3). Untersuchungen zu dieser Fragestellung wurden bisher nicht durchgeführt.

Der Grund für die festgestellte Signaldämpfung kann an dieser Stelle lediglich vermutet werden, jedoch deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Dämpfung mit steigender Wassertemperatur zunimmt. Bei einer Temperaturrekonstruktion mit Hilfe der Sauerstoffisotopenverhältnisse von fossilem biogenem Opal lakustriner Sedimente muss dieser Effekt in Form eines Korrekturfaktors berücksichtigt werden. Ob die Signaldämpfung aufgrund eines Isotopenaustauschs nach dem Absterben der Kieselalgen oder durch die Biomineralisation von Opal in tieferen Wasserschichten verursacht wird, ist dabei unerheblich.

13 Resümee und Ausblick

Erstmalig konnte in einem lakustrinen Ökosystem (Holzmaar) die Abhängigkeit des Sauerstoffisotopenverhältnisses rezenter Diatomeen von den sich im Jahresverlauf im Lebensraum der Algen ändernden Parameter Wassertemperatur (T_{H2O}) und Isotopenquellwert ($\delta^{18}O_{H2O}$) nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass die als Gleichgewichtsreaktion ablaufende Sauerstoffisotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal der Kieselalgenskelette temperaturabhängig ist. Diese Abhängigkeit kann durch den sog. Temperaturkoeffizienten [τ] charakterisiert werden, der die Fraktionierungsänderung bezüglich einer Temperaturveränderung darstellt. Dieser Koeffizient beträgt im pelagischen Lebensraum des Holzmaares im Temperaturintervall zwischen 3 und 22 °C im Mittel -0,19 ‰/°C.

Durch den geschilderten Zusammenhang ist die Möglichkeit gegeben, mit Hilfe der Sauerstoffisotopenverhältnisse des im Sediment des Sees abgelagerten biogenen Opals Temperaturänderungen des Wasserkörpers in der Vergangenheit zu rekonstruieren, wenn gleichzeitig Informationen über den Quellwert der Isotopenfraktionierung vorliegen. Als Konsequenz des ermittelten Temperaturkoeffizienten von ≈ -0,19 ‰/°C kann die Ableitung von Paläowassertemperaturveränderungen mit Hilfe von biogenem Opal dabei grundsätzlich nach der Gleichung T_{H2O} (°C) = 190,07 - 5,26 ($\delta^{18}O_{Opal}$ - $\delta^{18}O_{Wasser}$) erfolgen.

Die Sedimentation der im Epilimnion des Holzmaares aufgewachsenen Diatomeen in das Profundal und zur Sedimentoberfläche des Sees führt jedoch nach den bisherigen Ergebnissen zu einem systematischen signaldämpfenden Effekt. Dieser muss bei einer Temperaturrekonstruktion mit Hilfe der Sauerstoffisotopenverhältnisse von fossilem biogenem Opal berücksichtigt werden.

Wie gezeigt werden konnte, sind die Variationen des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes im Wasserkörper des Sees von großer Bedeutung für die Beurteilung der Isotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal. Bei einer Interpretation der Sauerstoffisotopenverhältnisse von fossilem biogenem Opal lakustriner Sedimente im Sinne einer Klima- bzw. Temperaturrekonstruktion müssen daher Quellwertveränderungen der erdgeschichtlichen Vergangenheit einbezogen werden. Unter Berücksichtigung solcher Quellwertveränderungen ermöglicht die für das Holzmaar nachgewiesene enge Koppelung der oberflächennahen Wassertemperatur an die regionale Lufttemperatur den Einsatz von $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten des fossilen biogenen Opals der Holzmaar-Sedimente als Temperaturproxie.

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:

- Die im Laborexperiment nachgewiesene Temperaturabhängigkeit der Sauerstoffisotopenfraktionierung von Süßwasserdiatomeen konnte im Rahmen der Kalibrierungsstudie im Holzmaar erstmalig in einem rezenten Ökosystem bestätigt werden.
- Das Sauerstoffisotopenverhältnis des Wasserkörpers zzt. der Biomineralisation des Opals hat einen entscheidenden Einfluss auf das Sauerstoffisotopensignal der Diatomeen. Ohne die Kenntnis des $\delta^{18}O_{H2O}$-Wertes wird die Fraktionierung zu gering eingeschätzt.
- Ein artspezifischer Einfluss auf die Sauerstoffisotopenfraktionierung rezenter Diatomeen aus dem pelagischen Lebensraum des Holzmaares konnte im Rahmen dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Aufgrund der bisher vorliegenden Datenbasis ist ein derartiger Einfluss jedoch nicht völlig auszuschließen.
- Im Zeitraum erhöhter Wassertemperaturen während der Sommer- und Herbstmonate wird der rein physiko-chemischen Effekt der Isotopenfraktionierung möglicherweise gedämpft bzw. überlagert. Diese Signaldämpfung deutet auf den Einfluss biotischer und/oder abiotischer Faktoren hin. Allgemein führt eine hohe Wassertemperatur jedoch zu niedrigen Temperaturkoeffizienten.

Die Ableitung einer Transferbeziehung zwischen den $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten des biogenen Opals lakustriner Sedimentsequenzen und der Wassertemperatur im Bildungszeitraum des Opals wird es in Zukunft ermöglichen, die Kenntnisse über die klimageschichtliche Entwicklung des menschlichen Lebensraumes zu erweitern. Da biogener Opal nahezu ubiquitär in marinen und lakustrinen Gewässern gebildet wird und z.T. im Sediment erhalten bleibt, kann diese biogene Substanz weltweit aus einer Vielzahl von Paläoklimaarchiven als Untersuchungsmaterial herangezogen werden. Sauerstoffisotopenverhältniswerte von biogenem Opal besitzen daher ein großes Potenzial für die Rekonstruktion der klimageschichtlichen Vergangenheit sehr unterschiedlicher Lebensräume.

Zur Minimierung von Fehleinschätzungen bei der Interpretation der Sauerstoffisotopenverhältniswerte fossiler Diatomeen sollten sich zukünftige Arbeiten auf die Ursachen des im Holzmaar festgestellten systematischen isotopensignaldämpfenden Effektes konzentrieren, der durch die Sedimentation der Kieselalgen in das Profundal des Sees hervorgerufen wird. So kann eine kurzzeitige Behandlung von bereits sedimentierten Valven mit Flusssäure zur Lösung der obersten Schichten des biogenen Opals führen und damit die vollständige Entfernung derjenigen Schichten des Opals ermöglichen, die möglicherweise das ursprüngliche, im Epilimnion aufgezeichnete Temperatursignal überlagern.

Die Vergrößerung der Datenbasis zur Sauerstoffisotopenfraktionierung von rezenten Diatomeen aus dem Holzmaar über mindestens eine weitere Vegetationsperiode hinweg würde eine erste Beurteilung möglicher intraannueller $\delta^{18}O_{SiO2}$-Variationen erlauben. Gleichzeitig kann auf diese Weise ein breiteres Fundament für die Interpretation der Abhängigkeit zwischen Fraktionierung und Wassertemperatur geschaffen werden. Darüber hinaus sollte die zeitliche Auflösung bei der Probengewinnung erhöht werden. Durch die Verkürzung des Akkumulationszeitraumes von derzeit 28 auf beispielsweise 14 Tage könnte die Berechnung der Fraktionierung für geringere Variationen der Wassertemperatur erfolgen.
Weiterhin sind zusätzliche taxonomische Untersuchungen von Kieselalgenproben aus den rezenten Sedimenten des Sees wünschenswert. Sie sollten die endgültige Beurteilung möglicher artspezifischer Fraktionierungseffekte erlauben.

Von größter Bedeutung ist die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die im Holzmaar in der Vergangenheit abgelagerten Sedimentsequenzen. Ein wesentliches Ziel zukünftiger Forschungsaktivitäten sollte darin bestehen, die im Rahmen der hier vorliegenden Kalibrierungsstudie gewonnenen Erkenntnisse auf den biogenen Opal des im Holzmaar abgelagerten Sediments zu übertragen. Auf diese Weise könnte ein Sauerstoffisotopen-Proxiedatensatz zur Temperaturrekonstruktion aus einem terrestrischen Archiv über das gesamte Holozän bis in das Spätglazial generiert werden. Hervorzuheben ist dabei die hervorragende Datierbarkeit der Sedimente des Holzmaares, die eine genaue Einordnung der Proxies in die erdgeschichtliche Vergangenheit ermöglichen.

Veränderungen der Paläowassertemperatur unter Anwendung des Temperaturkoeffizienten von ≈ -0,19 ‰/°C zu quantifizieren wird nur gelingen, wenn zusätzlich Informationen über die Veränderungen des $\delta^{18}O$-Wertes des Wassers bereitgestellt werden können.
Derartige sog. Quellwertveränderungen lassen sich möglicherweise auf der Basis der $\delta^{18}O$-Werte von fossiler aquatischer Zellulose ($\delta^{18}O_{Zel}$) abschätzen (z.B. WOLFE & EDWARDS 1997, BEUNING et al. 2002). Der Grund hierfür liegt in der Anreicherung des ^{18}O-Isotopes in der Zellulose von z.B. Grünalgen (*Chlorophytae*) und submersen aquatischen Moosen (*Bryophytae*) um 27 bis 28 ‰ gegenüber dem $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Gewässers, wobei diese Anreicherung unabhängig von Wassertemperaturänderungen sowie von der CO_2-Quelle oder einzelnen Algenspezies ist (SAUER et al. 2001). Die $\delta^{18}O_{Zel}$-Werte von aquatischer Zellulose bieten daher eine Möglichkeit, das Sauerstoffisotopenverhältnis des Wassers zu rekonstruieren und damit gleichzeitig Informationen über Veränderungen des regionalen Wasserkreislaufes zu erlangen.

Die Ermittlung von $\delta^{18}O$-Werten des biogenen Opals der jüngeren Sedimente des Sees würde den Anschluss von Paläodaten aus Bohrkernmaterial an die Jetztzeit ermöglichen (Sediment/Wasser-Interface). Auf diese Weise kann die vielfach vermutete diagenetische ^{18}O-Anreicherung in biogenem Opal beurteilt werden (KAMATANI et al. 1971, BARKER et al. 1994, BRANDRISS et al. 1998, SCHMIDT et al. 2001). Die Gefrierkerntechnik würde es erlauben, auch die oberflächennahen wasser- und gasreichen Sedimente des Holzmaares ungestört zu erschließen (GFZ Potsdam 2002). Aufgrund derzeitiger Sedimentationsraten zwischen 10 und 12 mm/a sollte zukünftig eine jahrgenaue Präparation junger Sedimentsequenzen möglich sein (ZOLITSCHKA 1990). Denkbar ist auch die weitere Unterteilung ungestörter Warven in eine Frühjahr/Sommer- und eine Herbst/Winterlage. Dies würde eine genauere Zuordnung der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte zu Paläotemperaturwerten ermöglichen.

14 Zusammenfassung

Innerhalb Mitteleuropas stellen die lakustrinen Sedimente des Holzmaares (Westeifel-Vulkanfeld) ein besonders gut geeignetes Paläoklimaarchiv zur Rekonstruktion der Klimageschichte eines menschlichen Lebensraumes dar. Da paläoklimatische Informationen in derartigen Archiven in verschlüsselter Form vorliegen, ist es nur möglich quantitative Stellvertreterdaten, sog. *Proxiedaten*, also Daten mit extrahierbaren Klimainformationen, zu ermitteln. Dies geschieht z.B. durch die Bestimmung der stabilen Isotope des Sauerstoffs einzelner Kompartimente des Sediments.

In der vorliegenden Kalibrierungsstudie wird die Eignung der Sauerstoffisotopenverhältnisse von fossilen Diatomeenvalven (Kieselalgenschalen) aus lakustrinen Sedimenten als Temperaturproxieparameter untersucht. Dabei wird der Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffisotopenverhältnis des biogenen Opals rezenter Diatomeenvalven und der Wassertemperatur im Zeitraum der Valvenbildung erstmals in einem offenen lakustrinen Ökosystem untersucht.

Eine im Holzmaar durchgeführte vierjährige Freilandstudie diente der Untersuchung sämtlicher Parameter, die für das Sauerstoffisotopenverhältnis der opalartigen Gerüstsubstanz der im Epilimnion des Sees aufwachsenden Diatomeen verantwortlich sind. Dabei wurden die saisonalen Variationen meteorologischer Größen und die zugehörigen Veränderungen der physikalischen und chemischen Parameter im Wasserkörper des Sees in zeitlich hoher Auflösung erfasst. Es zeigte sich, dass das Epilimnion der wichtigste Bereich des Gewässers bei der Übertragung von Umweltinformationen in die als Paläoklimaarchiv nutzbaren holozänen und spätglazialen Sedimente des Sees ist. Bezogen auf die mögliche Eignung fossiler Diatomeenvalven zur Temperaturrekonstruktion erfolgt im Epilimnion der Transfer von Klima- bzw. Witterungssignalen aus der Atmosphäre in das Gewässer und weiter in den biogenen Opal der Kieselschalen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die in Form einer Gleichgewichtsreaktion ablaufende Sauerstoffisotopenfraktionierung [$\varepsilon_{Opal\text{-}Wasser}$] zwischen dem Wasser, d.h. dem Lebensraum der Kieselalgen, und dem biogenen Opal der Algenskelette temperaturabhängig ist. Von besonderer Bedeutung für die Ableitung einer Beziehung zwischen Fraktionierung und Wassertemperatur ist neben der Temperatur im Zeitraum des Algenwachstums auch der zugehörige $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers, da dieser den sog. Quellwert für die Isotopenfraktionierung darstellt. Die räumlichen und zeitlichen Variationen der Wassertemperatur und der $\delta^{18}O_{H2O}$-Werte wurden im Holzmaar über vier Jahre beobachtet, und die enge Kopplung der Wassertemperatur im Epilimnion an die Lufttemperatur wurde dokumentiert. Aus den während der Geländekampagne in unterschiedlichen Wassertiefen gewonnenen rezenten Sedimentproben wurden die Kieselschalen mit Hilfe der SPLITT-Fraktionierung separiert und

in drei Größenklassen unterteilt. Zur quantitativen Extraktion des im biogenen Opal der Kieselschalen gebundenen Sauerstoffs wurde mit dem Hochtemperatur-Aufschlussverfahren ein völlig neuartiges Verfahren entwickelt, das die vollständige Umwandlung des biogenen Opals in ein für die Isotopenanalytik notwendiges Messgas ermöglicht und das zudem eine hervorragende Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse bei gleichzeitig relativ hohem Probendurchsatz gewährleistet.

Als wichtigstes Ergebnis der vorliegenden Arbeit konnte im Holzmaar unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen auf der Basis der ermittelten Variationen der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte des biogenen Opals eine systematische Beziehung zwischen der Sauerstoffisotopenfraktionierung [$\varepsilon_{Opal\text{-}Wasser}$] und der Wassertemperatur während des Kieselalgenwachstums nachgewiesen werden. Neben der im Zeitraum des Algenwachstums herrschenden Wassertemperatur wurde dabei auch der $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers berücksichtigt. Der Gradient dieses Zusammenhangs, der Temperaturkoeffizient [τ], charakterisiert die Größe der Veränderung der Fraktionierung mit einer vorgegebenen Temperaturveränderung. Er beträgt im offenen pelagischen Ökosystem des Holzmaares im Temperaturintervall zwischen 3 und 22 °C im Mittel -0,19 ‰/°C. Als Konsequenz des ermittelten Temperaturkoeffizienten kann die Ableitung von Paläowassertemperaturveränderungen mit Hilfe von biogenem Opal im Holzmaar grundsätzlich nach der Gleichung T_{H2O} (°C) = 190,07 - 5,26 ($\delta^{18}O_{Opal}$ - $\delta^{18}O_{Wasser}$) erfolgen.

Die Ergebnisse dieser Kalibrierungsstudie ergänzen und konkretisieren die vier bisher veröffentlichten Arbeiten, in denen Temperaturkoeffizienten für die Sauerstoffisotopenfraktionierung zwischen Wasser und biogenem Opal theoretisch abgeleitet bzw. in einem Laborexperiment experimentell ermittelt wurden. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird dieser Zusammenhang erstmalig in einem natürlichen Habitat, d.h. unter natürlichen Umweltbedingungen, nachgewiesen. Der systematische Zusammenhang zwischen der Sauerstoffisotopenfraktionierung und der Wassertemperatur im Zeitraum des Kieselalgenwachstums eröffnet die Möglichkeit, aus den $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werten fossiler Diatomeenvalven lakustriner Sedimente Wassertemperaturänderungen früherer Zeitabschnitte abzuleiten, wenn zusätzlich Informationen über den $\delta^{18}O_{H2O}$-Wert des Wassers, i.e. den Quellwert der Isotopenfraktionierung, vorliegen. Wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte, ist die oberflächennahe Wassertemperatur der Eifelmaarseen in hohem Maße von Veränderungen der regionalen Lufttemperatur abhängig. Hierduch sollte es in Zukunft möglich sein, durch den Einsatz von quantitativen Verknüpfungen (Transferfunktionen) mit Hilfe der $\delta^{18}O_{SiO2}$-Werte fossiler Kieselschalen aus den holozänen und spätweichselzeitlichen Sedimenten der Eifelmaarseen Veränderungen der Lufttemperatur im Eifelraum zu beschreiben.

15 Literaturverzeichnis

BARKER, P.; FONTES, J. C.; GASSE, F. & DRUART, J. C. (1994): Experimental dissolution of diatom silica in concentrated salt solutions and implications for palaeoenvironmental reconstruction. - In: *Limnology and Oceanography* **39**: 99-110.

BATTARBEE, K. E. (1981): Diatom and chrysophyceae microstratigraphy of the annually laminated sediments of a small meromictic lake. - In: *Striae* **14**: 105-109.

BEUNING, K. R. M.; KELTS, K.; RUSSELL, J. & WOLFE, B. B. (2002): Reassessment of Lake Victoria-Upper Nile River paleohydrology from oxygen isotope records of lake-sediment cellulose. - *Geology* **30**: 559-562.

BJELANOVIC, M. M. (1967): Mesoklimatische Studien im Rhein- und Moselgebiet: ein Beitrag zur Problematik der Landesklimaaufnahme, Bonn.

BLOESCH, J. & BURNS, N. M. (1980): A critical review of sedimentation trapp technique. - In: *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* **42**: 15-55.

BRANDRISS, M. E.; O´NEIL, J. R.; EDLUND, M. B. & STOERMER, E. F. (1998): Oxygen isotope fractionation between diatomaceous silica and water. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **62**: 1119-1125.

BÜCHEL, G. (1984): Die Maare im Vulkanfeld der Eifel, ihr geophysikalischer Nachweis, ihr Alter und ihre Beziehung zur Tektonik der Erdkruste. Dissertation. Universität Mainz. 181 S.

BÜCHEL, G. & LORENZ, V. (1982): Zum Alter des Maarvulkanismus der Westeifel. - In: *N. Jb. Geolog. Paläont. Abh.*, **163/1**: 1-22, Stuttgart.

BÜCHEL, G. & LORENZ, V. (1984): Zum Alter des Meerfelder Maares. - In: *Cour. Forsch. Inst. Senkenberg* **65**: 13-15.

BÜHL, A. & ZÖFEL, P. (2000): SPSS - Version 10. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows, München. 734 S.

CLAYTON, R.N. (1992): Silica-carbonate isotopic temperature calibration. - In: *Science* **258**: 1162-1163.

CLAYTON, R. N.; O´NEIL, J. R. & MAYEDA, T. K. (1972): Oxygen isotope exchange between quartz and water. - In: *Journal of Geophysical Research* **77**: 3057-3067.

CLOSS, H. (1979): Die Klimasituation im Regierungsbezirk Trier. - In: FRIEDRICH, L. (Hrsg.): *Beiträge zur Trierischen Landeskunde*: 326-377, Trier.

CONTARDO, C.; DONDI, F.; BECKETT, R. & GIDDINGS, J. C. (1997): Separation of particulate environmental samples by SPLITT fractionation using different operating modes. - In: *Analytica Chimica Acta* **345**: 99-110.

CRAIG, H. (1957): Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **12**: 133-149.

DANSGAARD, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. - In: *Tellus* **16**: 436-468.

DANSGAARD, W.; JOHNSEN, S. J.; CLAUSEN, H. B.; DAHL-JENSEN, D.; GUNDESTRUP, N. S.; HAMMER, C. U.; HVIDBERG, C. S.; STEFFENSEN, J. P.; SVEINBJÖRNSDOTTIR, A. E.; JOUZEL, J. & BOND, G. (1993): Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. - In: *Nature* **364**: 218-220.

DARLEY, W. M. (1982): Algal Biology: a physiological approach. Oxford, 168 S.

DEGENS, E. T.; GUILLIARD, R. R. L.; SACKETT, W. M. & HELLEBUST, J. A. (1968): Metabolic fractionation of carbon isotopes in marine plankton - In: *Deep-Sea Reserch* **15**: 1-9.

DOVE, P.M. & RIMSTIDT, J.D. (1994): Silica-water interactions. - In: HEANEY, P. J.; PREWITT, C. T. & GIBBS, G. V. (eds.): Silica - physical behavior, geochemistry and materials applications, Reviews in Mineralogy 29, Mineralogical Society of America: 259-308.

DÜBGEN, R. & POPP, G. (1984): Glasartiger Kohlenstoff. Sigradur - ein Werkstoff für Chemie und Technik. - In: *Werkstofftechnik* **15**: 331-338.

DWD (1978): Das Klima der Bundesrepublik Deutschland. Niederschlag (1931-1960), Offenbach.

DWD (2002): Station Manderscheid. Datensatz 01.01.1994 bis 30.11.2001. Offenbach.

DWD (2002): Station Trier-Petrisberg. Datensatz 01.01.1994 bis 20.12.2001. Offenbach.

EPSTEIN, S. & KRISHNAMURTHY, R. V. (1990): Environmental information in the isotopic record in trees. - In: *Philosophical Transactions of the Royal Society London* **330**: 427-439.

FALBE, J. & REGLITZ, M. (1993): Römpp Chemie Lexikon. 9., erweiterte und neubearbeitete Auflage. Stuttgart.

FETZER, K. D.; LARRES, K.; SABEL, K. J.; SPIES, E.-D. & WEIDENFELDER, M. (1995): X. Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland. - In: BENDA, L.: Das Quartär Deutschlands. Berlin, Stuttgart. 408 S.

FLYNN, K. J. & MARTIN-JÉZÉQUEL, V. (2000): Modelling Si-N-limited growth of diatoms. - In: *Journal of Plankton Research* **22**: 447-472.

FÖRSTEL, H. & HÜTZEN, H. (1982): $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisse im Grundwasser der Bundesrepublik Deutschlang. - In. *Berichte der Kernforschungsanlage Jülich* **1784**. 59 S.

FRENZEL, B. (Hrsg.) (1995): Problems of stable isotopes in tree-rings, lake sediments and peat-bogs as climatic evidence for the Holocene. - In: *Paläoklimaforschung* **15**. Gustav Fischer, Stuttgart. 189 S.

FUH, C. B. (2000): Split-Flow Thin Fractionation. SPLITT fractionation is a new family of separation techniques for macromolecules, colloids, and particles. - In: *Analytical Chemistry* **72**: 266 - 271.

GARLICK, G. D. (1969): The stable isotopes of oxygen. In: WEDEPOHL, K.H. (ed.): Handbook of geochemistry, Vol. 8b, Berlin.

GIDDINGS, J. C. (1985): A System Based on Split-Flow Lateral-Transport Thin (SPLITT) Separation Cells for Rapid and Continuous Particle Fractionation. - In: *Separation Science and Technology* **20**: 749-768.

GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM (2002): Zweijahresbericht 2000/2001. Potsdam. 104 S.

HAIMSON, M. & KNAUTH, L. P. (1983): Stepwise fluorination - a useful approach for the isotopic analysis of hydrous minerals. - In: *Geochimica et Cosmocimica Acta* **47**: 1589-1595.

HALBFASS, W. (1897): Tiefen- und Temperaturverhältnisse der Eifelmaare. - In: *Petermanns Geographische Mitteilungen* **43**: 149-153.

HAMMERLUND, D.; EDWARDS, T.; BJÖRCK, S.; BUCHARD, B. & WOHLFARTH, B. (1999): Climate and environmental during the Younger Dryas (GS-1) as reflected by composite stable isotope records of lacustrine carbonates at Terreberga, soutern Sweden. - In: *Journal of Quaternary Science* **14**: 17-28.

HAMZA, M. & EPSTEIN, S. (1980): Oxygen isotopic fractionation between different oxygen sites in hydrous silicate minerals. - In: *Geochimica et Cosmocimica Acta* **44**: 173-182.

HASEL, K. (1985): Forstgeschichte – Ein Grundriss für Studium und Praxis. Hamburg. 258 S.

HILTON, J.; LISHMAN, J.P. & ALLEN, P.V. (1986): The dominant processes of sediment distribution and focusing in a small, eutrophic, monomictic lake. - In: *Limnology and Oceanography* **31**: 125-133.

HOEFS, J. (1997): Stable Isotope Geochemistry. 4th, completely revised, updated and enlarged edition, Berlin. 196 S.

HORN, H. & HORN, W. (2000): Sedimentation - the Mail Loss Factor in Waters Dominated by Diatoms. Results of Long-Term Investigations. - In: *Internat. Rev. Hydrobiol.* **85**: 191-208.

HU, F. & SHEMESH, A. (2003): A biogenic-silica $\delta^{18}O$ record of climatic change durig the last glacial-interglacial transition in southwest Alaska. - In: *Quaternary Research* **0**: 1-7.

HUTTER, C. P.; BLESSING, K. & KOZINA, U. (1995): Wälder, Hecken und Gehölze. Biotop-Bestimmungsbücher. Stuttgart-Wien. 157 S.

IAEA (1992): Statistical treatment of data on environmental isotopes from precipitation. - In: *Technical Report Series* **331**, Vienna. 781 S.

IPCC (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report - Summary for policymakers. (www.ipcc.ch).

JUILLET, A. (1980): Structure de la silice biogénique : novelles données apportées par l´analyse isotopique de l`oxygéne. - In : *C.R. Acad. Sc. Paris, D, t.* **290**: 1237-1240.

JUILLET, A.; LABEYRIE, L. D. & SCHRADER, H. (1983): Oxygen isotope composition of diatom silica and silicoflagellate assemblage changes in the Gulf of California: a 700-year upwelling study. - In: THIEDE, J. & SUESS, E. (eds.): Coastal upwelling - its sediment record, Part B. - NATO Conference Series IV/10B, New York.

JUILLET-LECLERC, A. & LABEYRIE, L. D. (1987): Temperature dependence of the oxygen isotopic fractionation between diatom silica and water. - In: *Earth and Planetary Science Letters* **84**: 69-74.

JUILLET-LECLERC, A. & SCHRADER, H. (1987): Variations of upwelling intensity recorded in varved sediments from the Gulf of California during the past 3.000 years. - In: *Nature* **329**: 146-149.

JUILLET-LECLERC, A.; LABEYRIE, L.D. & REYSS, J.L. (1991): Temperature variability in the Gulf of California during the last century: A record of the recent strong El Nino. - In: *Geophysical Research Letters* **18**: 1889-1892.

JOHNSEN, S.J.; DAHL-JENSEN, D.; GUNDESTRUP, N.S.; STEFFENSEN, J.P.; CLAUSEN, H.B.; MILLER, H.; MASSON-DELMONTE, V.; SVEINBJÖRNSDOTTIR, A.E. & WHITE, J. (2001): Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye-3, GRIP, GISP2, Renland and NorthGRIP. - In: *Journal of Quaternary Science* **16**: 299-307.

KAMATANI, A. (1971): Physical and chemical characteristics of biogenic silica. - In: *Marine Biology* **8**: 89-95.

KELTZ, K. & TALBOT, M. (1990): Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions. - In. TILZER, M. M. & SERRUYA, C. (eds.): Large lakes - ecological structur and function. Springer, Berlin, 288-315.

KIENLE, J.; KYLE, P. R.; SELF, S.; MOTYKA, R. J. & LORENZ, V. (1980): Ukinrek maars, Alaska, 1. April 1977 eruption sequence, petrology and tectonic setting. - In: *J. Volcanol., geotherm. Research* **7**: 11-37.

KLINK, H. J. & SLOBODDA, S. (1994): Vegetation. - In: LIEDKE, H. & MARINEK, I. (Hrsg.): Physische Geographie Deutschlands. Gotha: 157-196.

KNAUTH, L. P. & EPSTEIN, S. (1982): The nature of water in hydrous silica. - In: *American Mineralogist* **67**: 510-520.

KRAMER, K. (1986): Kieselalgen - Biologie, Baupläne der Zellwand, Untersuchungs-methoden. Stuttgart, 140 S.

KRAMER, K & LANGE-BERTALOT, H. (1991): Bacillariophyllaceae; 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. - In: ETTL, H.; GERLOFF, J.; HEYNIG, H. & MOLLENHAUER, D. (Hrsg.): Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart, 576 S.

KRAUSKOPF, K. B. (1959): The geochemistry of silica in sedimentary environments. - In: *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Spec. Pub.* **7**: 4-19.

LABEYRIE, L. D. (1972): Composition isotopique de l`oxygène de la silice biogénique. - In: *C.R. Acad. Sc. Paris, D, t.* **274**: 1605-1608.

LABEYRIE, L. D. (1974): New approach to surface seawater palaeotemperatures using $^{18}O/^{16}O$ ratios in silica of diatom frustules. - In: *Nature* **248**: 40-42.

LABEYRIE, L. D. & JUILLET, A. (1980): Échangeabilité isotopique de l`oxygène de la silice biogénique. - In : *C.R. Acad. Sc. Paris, D, t.* **290**: 1185-1188.

LABEYRIE, L. D. & JUILLET, A. (1982): Oxygen isotopic exchangeability of diatom valve silica; interpretation and consequences for paleoclimatic studies. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **46**: 967-975.

LAMPERT, W. & SOMMER, U. (1993): Limnoökologie. - Stuttgart, 440 S.

LIPP, J.; TRIMBORN, P.; FRITZ, P.; MOSER, H.; BECKER, B. & FRENZEL, B. (1991): Stable isotopes in tree ring cellulose and climatic change. - In: *Tellus* **43**: 322-330.

LORENZ, V. (1970): Some Aspects of the Eruption Mechanism of the Big Hole Maar, Central Oregon. - In: *Geol. Soc. Amer. Bull.* **81**: 1823-1830.

LORENZ, V. (1973): On the Formation of Maars. - In: *Bull. Volcan.* **37**: 183-204, Neapel.

LORENZ, V. & BÜCHEL, G. (1978): Phreatomagmatische Vulkane in der südlichen Westeifel, ihr Alter und ihre Beziehung zum Talnetz. - In: *Zeitschr. Dt. Geol. Ges.* **19**: 30-41, Hannover.

LORENZ, V. & ZIMANOWSKI, B. (2000): Vulkanologie der Maare der Westeifel. - In: NEUFFER, F.O. & LUTZ, H. (Hrsg.): Exkursionsführer Internationale Maartagung Daun/Vulkaneifel. Mainzer Naturwiss. Archiv, Beiheft 24: 5-51.

LOTTER, A. F.; EICHER, U.; SIEGENTHALER, U. & BIRKS, H. J. B. (1992): Late-glacial climatic oscillations as recorded in Swiss lake sediments. - In: *Journal of Quaternary Science* **7**: 187-204.

LÜCKE, A. (1998): Die Sauerstoffisotope der biogenen Silikate des Holzmaares als mögliches Klimaarchiv - Eine limnologisch-hydrochemische, sedimdentologische und isotopen-geochemische Prozessstudie. - In: *Berichte des Forschungszentrums Jülich* **3523**: 90 S.

LÜCKE, A. & CASPER, S. J. (1996): Sauerstoffisotopenmessungen im Wasserkörper des Stechlinsees 1995. Unveröffentlichter Arbeitsbericht. Forschungszentrum Jülich: 9 S.

LÜCKE, A.; MOSCHEN, R. & SCHLESER, G. H. (2002): Die Hochtemperaturzelle HTZ. Ein neues Verfahren zur Extraktion von Sauerstoffisotopen aus biogenen Silikaten. - In: *Berichte des Forschungszentrums Jülich* **4010**: 24 S.

LÜCKE, A.; MOSCHEN, R. & SCHLESER, G. H. (2004): High temperature carbon reduction of silica: A novel approach for oxygen isotope analysis of biogenic opal. - In: (*Geochimica et Cosmochimica Acta* - ***in press***).

LÜNING, J. & STEHLI, P. (1989): Die Bandkeramiker in Mitteleuropa: von der Natur- zur Kulturlandschaft. - In: *Spektrum der Wissenschaft* **1989**: 78-88.

MARTIN, J.-M. (1985): The Pavin Crater Lake. - In: STUMM, W. (ed.): Chemical Processes in Lakes. New York, 169-188.

MARTIN-JÉZÉQUEL, V.; HILDEBRAND, M. & BRZEZINSKI, M. A. (2000): Silicon metabolism in diatoms: Implications for growth. - In: *Journal of Phycology* **36**: 821-840.

MATHENEY, R.K. & KNAUTH, L.P. (1989): Oxygen-isotope fractionation between biogenic silica and seawater. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **53**: 3207-3214.

MELZER, A. (1992): Submersed macrophytes. - In: SCHARF, B.W. & BJÖRK, S. (Hrsg.): Limnology of Eifel maar lakes. - Ergebnisse der Limnologie 38, Stuttgart, 348 S.

MERTZ, P. (2000): Pflanzengesellschaften Mitteleuropas und den Alpen. Landsberg/Lech. 511 S.

MEYER, W. (1985): Zur Entstehung der Maare in der Eifel. - In: *Zeitschr. Dt. Geol. Ges.* **136**: 141-155, Hannover.

MEYER, W. (1994): Geologie der Eifel. - 3., erg. Aufl., Stuttgart, 618 S.

MCKENZIE, J. A. & HOLLANDRER, D. J. (1993): Oxygen-Isotope Record in Recent Carbonate Sediments from Lake Greifen, Switzerland (1750-1986): Application of Continental Isotopic Indicator for Evaluation of Changes in Climate and Atmospheric Circulation Patterns. - In: *Geophysical Monograph* **78**: 101-111.

MCMANUS, J.; HAMMOND, D. E.; BERELSON, W. M.; KILOGE, T. E.; DEMASTER, D. J.; RAGUENEAU, O. G. & COLLIER, R. W. (1995): Early diagenesis of biogenic opal: Dissolution rates, kinetics, and paleoceanographic implications. - In: *Deep-Sea Research II* **42**: 871-903.

MIKKELSEN, N.; LABEYRIE, L. & BERGER, W. H. (1978): Silica oxygen isotopes in diatoms: a 20,000 yr record in deep-sea sediments. - In: *Nature* **271**: 536-538.

MOSER, H. & RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie, Lehrbuch der Hydrologie, Band 8, Stuttgart, 400 S.

NCDC - National Climatic Data Center: Online Library (www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html).

NEGENDANK, J. F. W. (1983): Trier und Umgebung. - Sammlung geologischer Führer 60, 2. überarbeitete Aufl., Berlin, 195 S.

NEGENDANK, J. F. W.; BRAUER, A. & ZOLITSCKA, B. (1990): Die Eifelmaare als erdgeschichtliche Fallen und Quellen zur Rekonstruktion des Paläoenvironmets. - In: *Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen* **19**: 235-262.

NEGENDANK, J. F. W. & ZOLLITSCKA, B. (1993): Paleolimnology of European Maar Lakes. - Lecture Notes in Earth Sciences 49, Berlin, 513 S.

OEHMS, M. (1995): Zur Limnologie des Holzmaares. - In: GeoForschungsZentrum Potsdam (Hrsg.): Das Holzmaar und seine Sedimente, Tagungsband zum Symposium, Scientific Technical Report STR95/16, Potsdam, 8.

PAFFEN, K. H. (1957): Moseleifel. - In: MEYNEN; E. & SCHMIDTHÜSEN, J. (Hrsg.): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands: 386-388, Bonn.

POTT, R. (1996): Biotoptypen - Schützenswerte Lebensräume Deutschlands und angrenzender Regionen. Stuttgart. 448 S.

REYNOLDS, C. S. (1984): The ecology of freshwater phytoplankton. In: Cambridge University Press. Cambridge. 374 S.

RICKETTS, R. D. & JOHNSON, T. C. (1996): Climate change in the Turkana basin as deduced from a 4000 year long delta^{18}O record. - In: *Earth and Planetary Science Letters* **142**: 7-17.

RIETTI-SHATI, M.; SHEMESH, A. & KARLEN, W. (1998): A 3,000-year climatic record from biogenic silica oxygen isotopes in an equatorial high-altitude lake. - In: *Science* **281**: 980-982.

RIMSTIDT, J. D. & BARNES, H. L. (1980): The kinetics of silica-water reactions. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **44**: 1683-1699.

RINGS, A. (2002): Extraktion von Diatomeenschalen mittels SPLITT-Fraktionierung. Ein neues verfahren zur Abtrennung von Diatomeenschalen aus limnischen Sedimenten. - In: *Berichte des Forschungszentrums Jülich* **3968**: 151 S.

RINGS, A.; SCHLESER, G. H.; LÜCKE, A. & WILHELM, R. (1999): Separation of diatoms from lake sediments with SPLITT-fractionation. - The 2nd international congress on limnology, Abstract, Poster 47.

RINGS, A.; LÜCKE, A. & SCHLESER, G. H. (2004): A new methode for the quantitative separation of diatom frustules fromlake sediments. - In: *Limnology and Oceanography: Methods* **2**: 25-34.

RIOUAL, P.; ANDRIEU-PONEL, V.; RIETTI-SHATI, M.; BATTARBEE, R.W.; DE BEAULIEU, J.-L.; CHEDDADT, R.; REILLE, M.; SVOBODOVA, H. & SHEMESH, A. (2001): High-resolution record of climate stability in France during the last interglacial period. - In: *Nature* **413**: 293-296.

ROSA, F.; BLOESCH, J. & RATHKE, D.E. (1991): Sampling the settling and suspended particulate matter (SPM). - In: MURDOCH. A. & MACKNIGHT S.D. (eds.): Handbook of techniques for aquatic sediments sampling. - CRC, Boca Raton, 97-130.

ROUND, F. E.; CRAWFORD, R. W. & MANN, D. G. (1990): The Diatoms. Biology & morphology of the genera.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS L. & GONFIANTINI, R. (1992): Relationship Between Long-Term Trends of Oxygen^{18} Isotope Composition of Precipitation and Climate. - In: *Science* **258**: 981-984.

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS L. & GONFIANTINI, R. (1993): Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. - In: Climate *Change in Continental Isotopic Records, Geophysical Monograph* **78**: 1-36.

SAURER, M.; AELLEN, K. & SIEGWOLF, R. (1997): δ^{13}C and δ^{18}O in cellulose of trees. - In: *Plant, Cell and Environment* **20**: 1543-1550.

SAUER, P. E.; MILLER, G. H. & OVERPECK, J. T. (2001): Oxygen isotope ratios of organic matter in arctic lakes as a paleoclimate proxy: field and laboratory investigations. - In: *Journal of Paleolimnology* **25:** 43-64.

SCHARF, B. W. (1987): Limnologische Beschreibung, Nutzung und Unterhaltung von Eifel-maaren. - Ministerium für Umwelt und Gesundheit Rheinland-Pfalz, Mainz, 117 S.

SCHARF, B. W. & MENN, U. (1992): Hydrology and morphometry. - In: SCHARF, B.W. & BJÖRK, S. (Hrsg.): Limnology of Eifel maar lakes. - Ergebnisse der Limnologie 38, Stuttgart, 348 S.

SCHARF, B. W. & OEHMS, M. (1992): Physical and chemical charakteristics. - In: SCHARF, B.W. & BJÖRK, S. (Hrsg.): Limnology of Eifel maar lakes. - Ergebnisse der Limnologie 38, Stuttgart, 348 S.

SCHLESER, G. H.; HELLE, G.; LÜCKE, A. & VOS, H. (1999): Isotope signals as climate proxis: the role of transfer functions in the study of terrestrial archives. - In: *Quaternary Science Reviews* **18**: 927-943.

SCHLESER, G. H.; LÜCKE, A.; MOSCHEN, R. & RINGS, A. (2000): Separation Diatoms from sediments and oxygen isotope extraction from their siliceous valves - a new approach. - In: *Proceedings of the OLDP meeting*.

SCHMIDT, M.; BOTZ, R.; STOFFERS, P.; ANDERS, T. & BOHRMANN, G. (1997): Oxygen isotopes in marine diatoms: a comparative study of analytical techniques and new results on the isotope composition of recent marine diatoms. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **61**: 2275-2280.

SCHMIDT, M.; BOTZ, R.; RICKERT, D.; BOHRMANN, G.; HALL, S. R. & MANN, S. (2001): Oxygen isotopes in marine diatoms and relations to opal-A maturation. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **65**: 201-211.

SCHMINCKE, H.-U. (2000): Vulkanismus. - Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt. 2. Aufl., 264 S.

SCHWIND, W. (1983): Der Wald der Vulkaneifel in Geschichte und Gegenwart. - Dissertation an der Universität Göttingen.

SCHWOERBEL, J. (1986): Methoden der Hydrobiologie, Süsswasserbiologie. 3. neu bearbeitete Auflage, Stuttgart, 301 S.

SCHWOERBEL, J. (1993): Einführung in die Limnologie. 7., vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart, 387 S.

SHACKLETON, N. J. (1987): Oxygen isotopes, ice volume and sea level. - In: *Quaternary Science Reviews* **6**: 183-190.

SHEMESH, A.; CHARLES, C. D. & FAIRBANKS, R. G. (1992): Oxygen isotopes in biogenic silica: global changes in ocean temperature and isotopic composition. - In: *Science* **256**: 1434-1436.

SHEMESH, A.; BURCKLE, L. H. & HAYS, J. D. (1995): Late Pleistocene oxygen isotope records of biogenic silica from the Atlantic sector of the Southern Ocean. - In: *Paleoceanography* **10**: 179-196.

SIEGENTHALER, U. (1979): Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Cycle. - In: JÄGER, E. & HUNZIKER, J.C. (Hrsg.): Lectures in Isotope Geology: 264-273, Berlin.

SIEGENTHALER, U. & OESCHGER H. (1980): Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude. - In: *Nature* **285**: 314-316.

SIEGENTHALER, U.; EICHER, U.; OESCHGER, H. & DANSGAARD, W. (1984): Lake sediments as continental d18O-records from glacial/post-glacial transition. - In: *Annals of Glaciology* **5**: 149-152.

SIGG, L. & STUMM, W. (1994): Aquatische Chemie. - In: Verlag der Fachvereine, Zürich. Stuttgart. 498 S.

SMOL, J. P.; WALKER, I. R. & LEAVITT, P. R. (1991): Palaeolimnology and hindcasting climatic trends. - In: *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie* **24**: 1240-1264.

SOMMER, U. (1988): Growth and survival strategies of planctonic diatoms. - In: SANDGREN, C.D. (ed.): Growth and reproductive stratetgies of freshwater phytoplankton, Cambridge: 227-260.

SOMMER, U. & STABEL, H.-H. (1983): Silicon consumption and population density changes of dominant planctonic diatoms in Lake Constance. - In: *Journal of Ecology* **71**: 119-130.

STATISTISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ, Stand 2001 (www.statisktik-rp.de).

STEININGER, J. (1820): Die erloschenen Vulkane der Eifel und am Niederrheine, Mainz. 180 S.

STUMM, W. & MORGAN, J. J. (1981): Aquatic chemistry - an introduction emphasizing chemical equlibria in natural waters. 2. Auflage. New York. 780 S.

SUHR, P. & GOTH, K. (2002): Maare - eine lange Zeit unbekannte Erscheinungsform des tertiären Vulkanismus in der Oberlausitz. - In: *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft der Oberlausitz* **10**: 27-45.

SWART, P. K.; MCKENZIE, J. A. & LOHMANN, K. C. (eds.) (1993): Climate change in continental isotopic records. - In: *Geophysical Monograph* **78**. 374 S.

TALBOT, M. R. (1990): A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates. - In: *Chemical Geology* **80**: 261-279.

TERANES, J. L. & MCKENZIE, J. A. (2001): Lacustrine oxygen isotope record of 20th-century climate change in central Europe: evaluation of climatic controls on oxygen isotopes in precipitation. - In: *Journal of Palaeolimnology* **26**: 131-146.

THIENEMANN, A. (1914): Physikalische und chemische Untersuchungen in den Maaren der Eifel. - In: *Verhandl. des naturhist. Vereins der preuß. Rheinlande und Westfalens* **71**: 250-302.

THORLEIFSON, J.T. & KNAUTH, L.P. (1984): An improved stepwise fluorination procedure for the oxygen isotopic analysis of hydrous silica. - In: *Geological Society of America, Abstract Program* **16**: 675.

TILMAN, D.; KILHAM, S. S. & KILHAM, P. (1982): Phytoplanktopn community ecology: the role of limiting nutrients. - In: *Annual Review of Ecology and Systematics* **13**: 3349-372.

TREYDTE, K. (2003): Dendro-Isotope und Jahrringbreiten als Klimaproxis der letzten 1.200 Jahre im Karakorumgebirge/Pakistan. - In: *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment* **38**: 167 S.

VAN DEN HOEK, C.; JAHNS, H. M. & MANN, D. G. (1993): Algen - 3. neu bearbeitete Aufl., Stuttgart, 411 S.

VON GRAFENSTEIN, U.; ERLENKEUSER, H.; MÜLLER, J.; TRIMBORN, P. & ALEFS, J. (1996): A 200 year mid-European air temperature record preserved in lake sediments: An extension of the $\delta^{18}O_P$-air temperature relation into the past. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **60**: 4025-4036.

VON GRAFENSTEIN, U.; ERLENKEUSER, H. & TRIMBORN, P. (1999): Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offset and autoecological effects of interest for palaeoclimate studies. - In: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **148**: 133-152.

VON GRAFENSTEIN, U.; EICHER, U.; ERLENKEUSER, H.; RUCH, P.; SCHWANDER, J. & AMMANN, B. (2000): Isotope signature of the Younger Dryas and two minor oscillations at Gerzensee (Switzerland) - palaeoclimatic and palaeolimnologic interpretation based on bulk and biogenic carbonates. - In: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **159**: 215-229.

VON ZABERN, P. (1977): Führer zu vor- und frühgeschichtlichen Denkmälern. Südwestliche Eifel: Bitburg - Prüm - Daun - Wittlich (Band 33). Herausgegeben durch das Römisch-Germanische Zentralmuseum Mainz. 341 S.

VON HAAREN, C. (1992): The developement of landscape around the maar lakes. - In: SCHARF, B.W. & BJÖRK, S. (Hrsg.): Limnology of Eifel maar lakes. - In: *Ergebnisse der Limnologie* **38**, Stuttgart, 348 S.

WANG, C.-H. & YEY, H.-W. (1985): Oxygen isotopic composition of DSDP site 480 diatoms: implications and applications. - In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* **49**: 1469-1478.

WETZEL, R. G. (2001): Limnology - Lake and River Ecosystems. San Diego, San Francisco, New York. 1006 S.

WENZEL, I. (1962): Ödlandentstehung und Wiederaufforstung in der Zentraleifel. - In: *Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde* **18**, Bonn. 119 S.

WILK-WOZNIAK, E.; POCIECHA, A. & BUCHA, H. (2001): Phytoplankton-zooplankton interactions, size relations and adaptive responses. A short review. - In: *Ecohydrology & Hydrobiology* **1**: 511-517.

WOLFE, B. B. & EDWARDS, T. W. D. (1997): Hydrologic control on the oxygen-isotope relation between sediment cellulose and lake water, western Taimyr Peninsula, Russia: Implications for the use of surface-sediment calibrations in paleolimnology. - *Journal of Paleolimnology* **18**: 183-191.

ZOLITSCHKA, B. (1990): Jahreszeitlich geschichtete Seesedimente. - In: Documenta Naturae 60. München, 241 S.

ZOLITSCHKA, B. & NEGENDANK, J. F. W. (1995): Die jungquartären Maarseen des Westeifeler Vulkangebietes und das eozäne Eckfelder Maar, Exkursionsführer. - In: GeoForschungsZentrum Potsdam (Hrsg.): Das Holzmaar und seine Sedimente, Tagungsband zum Symposium, Scientific Technical Report STR95/16. Potsdam, 8-13.

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand im Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre V: Sedimentäre Systeme der Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ) in der Zeit von Oktober 2000 bis September 2003. Für die finanzielle Unterstützung im Rahmen eines dreijährigen Doktorandenstipendiums bin ich dem Forschungszentrum Jülich zu Dank verpflichtet.
Die vorliegende Studie soll als Grundlage für zukünftige Interpretationen der stabilen Sauerstoffisotopenverhältnisse von fossilem biogenem Opal aus lakustrinen Sedimenten im Sinne einer Klima- bzw. Temperaturrekonstruktion dienen. Sie wurde von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln als Dissertation angenommen. Die Referenten der Arbeit waren Herr Prof. Dr. U. Radtke vom Geographischen Institut der Universität zu Köln und Herr Prof. Dr. G. H. Schleser, kommissarischer Direktor des ICG-V: Sedimentäre Systeme. Die Disputation fand am 04. Februar 2004 statt.

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern, Herrn Prof. Dr. Gerhard H. Schleser und Herrn Prof. Dr. Ulrich Radtke. Herrn Prof. Schleser danke ich für die engagierte fachliche Betreuung der Arbeit und den unermüdlichen Einsatz um das ICG-V. Herrn Prof. Radtke, der mich bereits während meines Studiums der Geographie an der Universität zu Köln betreute, danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, das mir den Wechsel in die Jülicher Arbeitsgruppe ermöglichte sowie die fachliche Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Die finanziellen und logistischen Möglichkeiten des Institutes für Chemie und Dynamik der Geosphäre, die Werkstädten des Forschungszentrums Jülich und das hervorragende Team aus Technikern, LaborantInnen sowie wechselnden Praktikanten und Hilfskräften im ICG-V ermöglichten die Entwicklung der neuartigen Hochtemperatur-Aufschlussmethode und die Erzeugung von mehreren Tausend Sauerstoffisotopenverhältniswerten. Ein besonderes Dankeschön gilt den vielen Kolleginnen und Kollegen des ICG-V, ohne deren Mithilfe diese Arbeit nicht im vorliegenden Umfang hätte durchgeführt werden können. Insbesondere den vielen Begleitern bei der Feldarbeit am Holzmaar sei für Ihre Unterstützung gedankt.

Die Mitarbeiter der Biologisch-Ökologischen Station in Bettenfeld, Frau Dipl.-Ing. Dorothée Karger und Herr Gerhard Dawen, unterstützen die Geländekampagne durch die Überlassung eines Bootes und weiteren technischen Geräts. Außerdem führten sie die Probenahme am Meerfelder Maar durch und gaben jederzeit technische Unterstützung. Ohne sie hätte die Geländearbeit nicht in diesem Umfang durchgeführt werden können.

Frau Dr. Beata Messyasz von der Adam-Mickiewicz-Universität in Posna, Polen führte taxonomische Untersuchungen in drei rezenten Sedimentproben aus dem Holzmaar durch. Durch diese Arbeit konnte die wichtige Fragestellung bezüglich möglicher artabhängiger Effekte bei der Isotopenfraktionierung durch Süßwasserdiatomeen bearbeitet werden.

DANKSAGUNG

Meinem engsten Arbeitskollegen Herrn Dr. Andreas Lücke danke ich für die Hilfestellungen bei fachlichen und technischen Problemen. Auch ihm sei für die engagierte fachliche Betreuung zu jedem Zeitpunkt und die zahlreichen konstruktiven Diskussionen gedankt.

Schließlich möchte ich Frau Dipl.-Kauffrau Claudia Lauter herzlich für die Geduld und Motivation während der zeitweise von Rückschlägen begleiteten Methodenentwicklung des Hochtemperatur-Aufschlussverfahrens und ihre mentale und tatkräftige Unterstützung in der Endphase der Zusammenstellung dieser Arbeit danken.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mir meinen Lebensweg bis hierher ermöglicht haben.

Jülich im Oktober 2004 Robert Moschen

ANHANG



Das Holzmaar im Westeifel-Vulkanfeld
(Schrägluftbild aus östl. Richtung)



„Klimastation Holzmaar“ mit Datenaufzeichnungsgerät (Data-Logger); installiert auf einer Boje nahe der Seemitte



Hochtemperaturzelle (HTZ) mit eingekoppelter Generatorleistung von 40 % entsprechend einer Temperatur von ca. 1260°C



Detailansicht der Hochtemperaturzelle (HTZ) mit eingekoppelter Generatorleistung von 30 % entsprechend einer Temperatur von ca. 1000°C

ANHANG

METEOROLOGISCHE GRÖSSEN

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
01.01.99	0,5	0,0	-0,3	111,1	0,48	14.03.99	0,6	0,0	7,5	111,2	2,20
02.01.99	1,8	1,5	4,2	119,3	0,38	15.03.99	0,8	0,0	4,6	104,4	3,79
03.01.99	3,7	7,9	3,8	112,1	0,26	16.03.99	1,0	0,0	4,7	95,2	3,71
04.01.99	4,2	3,1	8,4	125,8	0,16	17.03.99	1,0	0,0	2,4	90,1	3,67
05.01.99	3,6	0,0	10,1	118,5	0,70	18.03.99	0,7	0,8	5,6	93,6	3,71
06.01.99	2,2	0,0	6,7	112,4	1,16	19.03.99	0,8	0,7	3,8	96,9	1,48
07.01.99	2,6	4,8	4,5	115,2	0,13	20.03.99	1,0	0,2	4,3	91,2	1,72
08.01.99	3,9	3,7	3,8	107,4	0,86	21.03.99	3,1	4,2	3,4	112,6	0,53
09.01.99	1,3	3,5	0,4	116,4	0,17	22.03.99	1,8	4,4	3,1	113,4	1,43
10.01.99	0,0	0,1	-0,6	110,9	0,20	23.03.99	3,2	1,1	4,8	125,3	0,74
11.01.99	0,0	0,0	-2,8	105,3	0,17	24.03.99	1,6	0,1	5,2	113,2	2,23
12.01.99	1,3	0,0	-3,2	102,6	0,53	25.03.99	1,6	0,4	7,3	105,4	2,58
13.01.99	3,6	1,1	0,4	112,4	0,60	26.03.99	1,8	1,2	8,2	116,0	1,16
14.01.99	3,4	2,1	1,9	116,7	0,69	27.03.99	0,9	0,2	4,7	101,5	1,45
15.01.99	4,7	0,5	4,1	114,7	0,19	28.03.99	0,8	3,6	3,6	101,7	1,37
16.01.99	4,6	0,0	6,6	93,1	0,59	29.03.99	0,8	0,0	3,7	106,0	4,35
17.01.99	1,7	3,8	3,7	118,1	0,17	30.03.99	0,9	0,0	5,4	106,8	4,34
18.01.99	1,2	0,0	2,4	126,1	0,81	31.03.99	0,6	0,0	7,9	101,3	3,63
19.01.99	3,2	0,0	3,3	110,0	0,88	01.04.99	1,1	0,0	10,2	84,6	3,58
20.01.99	1,4	0,0	2,8	100,9	1,42	02.04.99	0,9	0,2	10,6	94,4	3,86
21.01.99	0,3	0,0	2,7	122,3	0,68	03.04.99	1,2	1,1	10,5	120,3	3,34
22.01.99	0,5	0,0	2,6	125,9	0,59	04.04.99	1,4	0,6	9,8	105,2	3,20
23.01.99	1,1	0,0	0,4	122,2	0,83	05.04.99	1,5	0,0	10,4	115,8	2,19
24.01.99	2,6	0,3	2,7	126,2	0,22	06.04.99	2,1	4,2	11,2	109,2	3,22
25.01.99	4,5	5,2	7,6	125,7	0,14	07.04.99	1,8	0,9	7,4	104,3	1,93
26.01.99	2,7	2,5	3,2	110,5	0,76	08.04.99	0,8	0,0	7,8	99,0	2,43
27.01.99	2,8	9,7	1,9	110,4	0,80	09.04.99	0,8	0,0	6,7	102,1	5,02
28.01.99	2,1	7,2	2,1	119,2	0,57	10.04.99	1,8	0,0	8,0	107,0	3,19
29.01.99	0,3	0,0	-3,5	103,4	0,93	11.04.99	2,0	0,7	7,6	96,1	2,53
30.01.99	0,2	0,0	-4,7	102,0	0,85	12.04.99	3,2	8,8	5,3	119,8	0,85
31.01.99	0,9	0,0	-2,1	93,2	1,73	13.04.99	3,0	2,7	2,4	108,5	3,14
01.02.99	0,4	1,2	-0,2	123,1	0,24	14.04.99	2,9	10,0	0,9	118,4	1,15
02.02.99	0,5	1,5	2,3	127,4	0,32	15.04.99	2,2	15,7	0,9	116,9	2,38
03.02.99	1,5	0,0	2,7	124,9	0,50	16.04.99	1,0	0,7	2,3	106,9	2,58
04.02.99	3,9	2,6	5,6	126,3	0,21	17.04.99	0,8	0,0	2,7	105,7	3,62
05.02.99	2,9	2,2	1,7	101,1	0,60	18.04.99	0,7	0,6	2,8	103,8	3,31
06.02.99	2,1	1,7	0,4	109,1	0,52	19.04.99	0,8	2,6	3,0	112,2	3,65
07.02.99	2,1	4,1	-0,9	106,7	1,33	20.04.99	1,1	1,0	7,4	101,8	4,23
08.02.99	2,4	0,0	-2,2	100,9	1,45	21.04.99	2,58	6,1	10,8	107,6	2,60
09.02.99	0,7	0,2	-5,3	107,1	1,15	22.04.99	3,05	0,2	8,5	106,2	3,09
10.02.99	1,2	0,0	-3,6	108,6	1,35	23.04.99	1,03	2,2	8,8	115,7	4,20
11.02.99	0,6	0,8	-5,5	103,8	1,49	24.04.99	1,35	0,1	7,3	118,6	0,81
12.02.99	0,9	0,0	-7,9	97,8	2,06	25.04.99	0,67	0,0	9,7	107,3	3,84
13.02.99	0,8	0,0	-5,3	94,4	0,79	26.04.99	1,13	0,0	12,8	91,6	4,29
14.02.99	0,7	0,4	-5,0	96,0	2,05	27.04.99	1,25	0,0	11,8	98,1	3,98
15.02.99	2,6	0,0	-1,8	110,3	0,79	28.04.99	1,21	0,0	12,0	101,1	3,89
16.02.99	3,6	0,7	0,9	111,8	1,13	29.04.99	1,44	0,0	12,1	96,4	6,51
17.02.99	2,3	0,5	-0,7	105,4	0,84	30.04.99	0,74	0,0	13,8	89,9	4,34
18.02.99	0,7	7,7	1,0	124,8	0,67	01.05.99	0,80	1,4	11,7	111,5	3,42
19.02.99	3,0	2,7	5,7	130,9	0,41	02.05.99	0,80	0,0	11,3	88,9	6,02
20.02.99	1,3	2,1	2,8	121,3	1,07	03.05.99	1,13	0,0	13,7	83,8	6,12
21.02.99	3,8	6,0	3,4	112,9	0,30	04.05.99	2,24	0,6	12,2	79,7	4,29
22.02.99	2,6	2,4	-0,6	115,5	1,18	05.05.99	1,34	0,7	9,9	102,8	1,48
23.02.99	1,8	3,8	0,2	113,9	1,16	06.05.99	0,76	3,3	11,2	131,3	2,02
24.02.99	0,9	2,5	-3,1	109,7	1,17	07.05.99	0,80	1,9	14,0	113,1	5,83
25.02.99	0,9	1,9	-1,4	100,4	2,86	08.05.99	1,96	0,2	11,6	102,7	3,17
26.02.99	1,9	0,0	2,5	92,1	2,88	09.05.99	1,14	0,0	11,7	102,1	5,68
27.02.99	1,8	0,2	2,7	109,2	1,13	10.05.99	1,53	4,8	12,7	121,4	2,64
28.02.99	2,6	0,1	3,6	107,8	1,61	11.05.99	1,70	0,2	11,4	120,8	2,56
01.03.99	5,0	5,0	6,2	121,9	0,35	12.05.99	1,78	0,0	12,7	105,9	3,37
02.03.99	4,2	4,8	8,8	131,0	0,46	13.05.99	1,81	0,3	10,9	112,2	2,84
03.03.99	4,0	9,3	6,0	113,6	1,18	14.05.99	1,12	0,3	10,0	104,7	3,29
04.03.99	1,8	4,4	3,4	121,0	0,64	15.05.99	0,97	0,0	8,0	103,3	4,48
05.03.99	2,3	0,9	2,3	120,1	0,79	16.05.99	0,84	0,0	8,0	95,4	4,53
06.03.99	3,1	0,3	1,9	108,6	1,83	17.05.99	1,84	0,0	12,5	81,0	5,82
07.03.99	2,9	1,1	0,5	113,2	1,23	18.05.99	1,41	1,2	12,5	95,2	3,63
08.03.99	1,9	4,4	1,7	118,3	1,14	19.05.99	0,96	0,5	12,2	109,3	2,94
09.03.99	2,1	5,1	4,4	114,4	1,20	20.05.99	1,10	0,1	11,6	117,4	2,75
10.03.99	0,3	2,3	2,0	119,6	0,75	21.05.99	0,99	0,0	13,1	98,5	5,68
11.03.99	0,6	0,0	2,1	106,1	3,05	22.05.99	1,72	0,2	9,8	100,0	3,59
12.03.99	0,9	0,0	7,7	100,3	3,17	23.05.99	1,35	0,0	12,4	97,0	7,02
13.03.99	0,8	0,0	7,7	108,9	2,77	24.05.99	0,85	0,0	12,0	107,9	3,40

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
25.05.99	0,8	0,0	12,1	104,6	4,56	06.08.99	0,9	0,0	20,8	91,1	5,83
26.05.99	0,6	0,0	13,5	86,7	7,01	07.08.99	2,7	1,7	17,7	109,5	4,28
27.05.99	0,7	0,0	18,4	90,1	7,07	08.08.99	1,9	0,1	19,3	102,7	3,17
28.05.99	1,1	1,0	15,9	111,7	3,72	09.08.99	1,6	1,4	17,2	103,8	4,45
29.05.99	0,8	3,7	19,0	102,9	6,60	10.08.99	1,9	3,1	15,6	122,4	2,33
30.05.99	1,0	0,1	19,0	106,2	5,27	11.08.99	0,7	1,3	14,0	113,8	1,56
31.05.99	0,9	0,0	14,9	104,1	4,54	12.08.99	0,8	0,0	13,0	99,8	4,08
01.06.99	0,6	0,0	18,1	98,2	5,45	13.08.99	0,9	0,0	13,6	95,4	4,42
02.06.99	2,0	1,0	18,3	103,7	5,03	14.08.99	2,2	10,3	14,8	121,9	1,37
03.06.99	2,7	5,5	14,7	110,0	5,82	15.08.99	2,4	3,8	13,3	109,5	2,69
04.06.99	3,3	10,6	13,1	110,6	3,19	16.08.99	1,0	7,1	12,8	122,7	2,41
05.06.99	2,1	5,9	11,0	117,5	2,22	17.08.99	2,0	0,1	12,2	110,3	2,72
06.06.99	3,0	0,2	10,7	103,7	3,83	18.08.99	2,1	4,1	13,7	115,0	2,69
07.06.99	0,9	6,7	12,8	112,4	4,46	19.08.99	3,5	0,0	14,3	93,8	3,14
08.06.99	2,1	0,3	11,5	99,7	6,15	20.08.99	1,7	0,0	14,1	102,3	4,10
09.06.99	1,1	0,0	11,7	95,9	3,47	21.08.99	0,8	0,0	12,9	99,2	5,12
10.06.99	0,6	0,0	13,4	100,5	5,35	22.08.99	0,9	0,0	12,0	98,2	6,22
11.06.99	0,8	0,0	12,1	96,1	4,46	23.08.99	0,9	0,0	14,5	84,2	5,46
12.06.99	0,5	0,0	13,4	102,7	4,22	24.08.99	0,7	0,0	16,5	94,6	3,45
13.06.99	0,8	0,0	14,0	99,5	5,06	25.08.99	0,8	5,5	20,9	98,8	4,06
14.06.99	0,9	0,0	16,5	97,2	6,19	26.08.99	1,2	6,7	18,1	130,8	1,40
15.06.99	0,7	0,0	16,7	93,9	5,56	27.08.99	0,7	0,0	17,6	105,4	4,03
16.06.99	0,8	0,0	16,8	92,3	7,10	28.08.99	0,8	0,0	15,0	97,5	4,12
17.06.99	1,1	0,0	18,2	95,8	5,32	29.08.99	0,8	0,0	14,8	105,2	4,92
18.06.99	1,1	0,0	12,1	90,0	5,51	30.08.99	0,7	0,0	15,8	102,3	4,33
19.06.99	0,9	0,0	14,8	83,5	7,90	31.08.99	0,7	0,0	15,3	102,1	3,04
20.06.99	2,1	1,1	14,0	112,2	3,31	01.09.99	0,6	0,0	14,8	106,3	1,45
21.06.99	1,2	3,7	10,0	111,2	4,83	02.09.99	1,0	0,0	15,6	90,9	5,08
22.06.99	0,6	0,0	10,7	97,4	3,85	03.09.99	1,1	0,0	15,8	84,8	4,40
23.06.99	0,7	0,0	12,9	96,1	4,87	04.09.99	0,9	0,0	17,4	97,2	3,51
24.06.99	0,7	0,0	14,2	89,7	5,70	05.09.99	0,8	0,0	16,2	89,5	4,40
25.06.99	0,8	0,0	15,1	88,2	7,46	06.09.99	1,1	0,0	16,4	113,5	2,19
26.06.99	1,7	0,0	18,0	90,0	5,74	07.09.99	1,2	0,0	15,8	121,8	2,51
27.06.99	1,8	11,3	15,9	120,5	3,46	08.09.99	0,8	0,0	16,2	108,6	3,95
28.06.99	2,6	1,7	13,5	105,6	3,96	09.09.99	0,6	0,0	18,7	98,0	4,59
29.06.99	2,0	3,1	15,8	113,5	3,10	10.09.99	0,8	0,0	17,9	90,3	4,14
30.06.99	1,7	8,1	15,8	122,3	3,36	11.09.99	1,1	0,0	17,2	93,3	4,21
01.07.99	1,4	0,0	15,5	109,4	4,63	12.09.99	0,9	0,0	17,6	97,5	4,21
02.07.99	0,9	0,0	16,9	112,2	5,58	13.09.99	0,9	0,0	18,4	93,8	3,89
03.07.99	1,5	0,0	21,0	103,9	6,56	14.09.99	1,0	0,0	17,4	96,4	3,79
04.07.99	0,7	0,0	21,7	101,9	5,55	15.09.99	0,9	0,8	17,3	108,3	2,58
05.07.99	1,8	4,1	18,1	108,3	5,07	16.09.99	1,4	0,0	11,3	99,5	4,36
06.07.99	0,6	4,0	15,9	115,8	1,61	17.09.99	1,0	1,5	11,4	123,0	1,34
07.07.99	0,8	10,3	15,6	117,1	3,48	18.09.99	0,9	0,1	13,2	108,1	3,90
08.07.99	0,9	0,1	17,0	107,1	5,37	19.09.99	0,7	0,0	17,6	97,7	2,38
09.07.99	1,2	0,0	18,2	95,1	5,73	20.09.99	1,0	2,3	13,7	110,8	1,31
10.07.99	1,5	0,0	20,9	84,7	5,27	21.09.99	1,5	1,6	13,3	113,3	1,87
11.07.99	1,1	0,0	21,3	88,1	4,87	22.09.99	1,9	5,7	15,2	131,6	0,99
12.07.99	0,7	0,0	20,3	106,5	5,03	23.09.99	1,6	3,5	15,3	117,0	2,44
13.07.99	0,8	9,3	19,0	123,1	3,28	24.09.99	1,8	0,0	16,2	107,9	3,72
14.07.99	2,5	0,0	16,5	95,1	4,91	25.09.99	1,1	0,3	14,5	125,8	1,43
15.07.99	1,6	0,6	14,4	111,2	2,73	26.09.99	2,4	2,1	13,0	117,0	2,73
16.07.99	1,0	0,0	14,6	101,5	5,07	27.09.99	2,9	0,1	13,7	115,0	1,62
17.07.99	0,8	0,0	18,0	96,4	7,15	28.09.99	3,0	4,0	12,7	119,3	1,50
18.07.99	0,9	0,0	20,9	97,2	5,94	29.09.99	3,5	13,2	14,0	132,6	0,26
19.07.99	1,5	0,0	21,4	94,7	4,85	30.09.99	3,5	6,2	12,5	126,1	0,77
20.07.99	2,1	0,1	19,8	100,4	5,19	01.10.99	3,8	6,1	11,9	111,3	1,21
21.07.99	2,7	0,0	16,0	90,9	3,65	02.10.99	4,0	14,5	12,3	126,1	0,46
22.07.99	1,8	0,2	13,1	98,2	2,70	03.10.99	3,0	4,4	8,4	115,3	2,13
23.07.99	1,1	0,0	12,5	99,6	2,15	04.10.99	1,9	2,3	7,9	114,2	1,69
24.07.99	0,6	0,0	15,6	102,7	4,23	05.10.99	0,9	0,3	7,3	110,8	2,47
25.07.99	0,8	0,0	18,4	101,5	4,61	06.10.99	0,6	1,4	6,2	120,9	1,63
26.07.99	1,0	0,0	19,2	101,1	5,94	07.10.99	0,9	0,0	7,6	114,0	2,23
27.07.99	1,3	0,0	19,2	87,9	6,07	08.10.99	2,6	2,4	9,4	121,7	0,46
28.07.99	1,3	0,0	19,1	77,0	6,59	09.10.99	2,8	0,1	11,3	127,7	0,51
29.07.99	1,1	0,0	18,6	73,1	7,06	10.10.99	2,3	0,0	11,7	122,6	0,63
30.07.99	1,0	0,0	19,0	76,6	5,37	11.10.99	1,3	0,7	12,1	126,6	0,80
31.07.99	1,1	0,0	18,6	78,8	5,39	12.10.99	0,6	0,8	7,8	110,0	1,92
01.08.99	1,0	0,0	19,1	77,6	6,15	13.10.99	0,6	0,0	6,6	110,9	2,80
02.08.99	1,0	0,0	18,7	75,4	4,99	14.10.99	0,6	0,0	7,8	113,6	2,00
03.08.99	0,9	0,0	17,6	89,7	2,96	15.10.99	0,7	0,0	8,0	117,9	2,09
04.08.99	0,9	0,0	20,9	95,2	4,85	16.10.99	0,8	0,0	5,7	104,9	2,60
05.08.99	1,9	3,3	19,5	104,7	3,97	17.10.99	1,4	0,0	4,7	91,9	2,31

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
18.10.99	1,8	0,0	3,7	89,2	2,71	04.01.00	4,2	3,4	5,0	127,7	0,13
19.10.99	1,8	0,0	3,8	85,8	2,37	05.01.00	1,4	0,1	2,6	118,6	0,68
20.10.99	1,7	0,0	4,2	88,4	1,34	06.01.00	2,3	0,5	4,1	132,8	0,37
21.10.99	1,2	1,1	4,3	99,9	1,00	07.01.00	1,9	0,2	4,2	121,8	0,44
22.10.99	0,5	3,8	7,6	117,5	1,29	08.01.00	2,6	0,3	3,1	121,0	0,25
23.10.99	1,5	3,1	11,2	123,8	0,89	09.01.00	0,3	1,6	2,6	121,4	0,39
24.10.99	0,9	13,7	8,7	129,1	0,29	10.01.00	0,4	0,0	-0,9	114,4	0,74
25.10.99	1,5	0,5	9,8	122,7	0,97	11.01.00	0,7	0,0	-2,3	126,8	0,30
26.10.99	2,3	0,0	10,1	122,5	0,39	12.01.00	1,6	0,0	-0,5	115,7	0,19
27.10.99	1,5	0,0	8,8	120,8	1,27	13.01.00	1,9	0,0	-0,7	104,8	0,46
28.10.99	0,6	0,0	5,9	123,3	1,25	14.01.00	0,5	0,0	-0,3	120,9	0,47
29.10.99	0,6	0,0	8,1	125,7	0,92	15.01.00	0,5	0,0	-0,8	117,7	0,55
30.10.99	0,8	2,5	10,6	117,5	1,38	16.01.00	0,5	0,1	0,5	109,5	0,44
31.10.99	2,5	4,3	7,0	111,1	1,38	17.01.00	1,2	0,0	4,2	117,2	0,24
01.11.99	1,8	0,7	9,4	114,5	1,73	18.01.00	1,6	0,4	3,2	104,1	0,35
02.11.99	1,2	11,2	9,8	127,7	0,39	19.01.00	0,5	0,1	1,4	100,9	0,27
03.11.99	0,6	0,1	2,5	129,8	1,02	20.01.00	1,2	0,1	0,7	111,3	0,62
04.11.99	0,7	0,0	3,0	118,5	1,65	21.01.00	1,6	0,9	2,2	111,3	0,30
05.11.99	1,7	0,6	7,8	112,1	0,51	22.01.00	2,1	2,0	1,3	122,8	0,38
06.11.99	3,1	3,8	5,4	106,2	0,87	23.01.00	0,5	0,6	-1,1	115,8	0,61
07.11.99	2,3	0,0	5,7	112,1	0,45	24.01.00	0,4	0,0	-7,9	97,6	1,72
08.11.99	0,9	0,7	5,1	117,2	0,45	25.01.00	0,6	0,0	-6,2	100,6	1,90
09.11.99	0,4	1,0	6,8	118,4	0,66	26.01.00	0,5	0,0	-5,3	108,0	1,33
10.11.99	0,8	6,3	5,3	113,7	0,42	27.01.00	1,1	0,0	-3,8	105,8	1,74
11.11.99	2,1	2,5	2,7	109,9	0,32	28.01.00	2,8	0,0	-1,5	108,1	0,84
12.11.99	1,4	0,0	3,0	100,1	1,16	29.01.00	6,2	12,0	5,3	126,1	0,14
13.11.99	1,0	0,0	0,6	104,6	0,61	30.01.00	4,0	9,4	7,2	124,4	0,32
14.11.99	0,4	0,9	4,5	121,7	0,42	31.01.00	4,6	0,3	6,8	120,0	0,24
15.11.99	0,9	0,0	-1,1	98,3	1,23	01.02.00	3,0	0,0	5,7	124,0	0,51
16.11.99	1,4	0,0	-1,9	105,1	1,29	02.02.00	2,3	0,4	3,6	122,7	0,27
17.11.99	2,3	0,9	0,7	124,5	0,32	03.02.00	2,1	0,0	3,7	108,5	0,53
18.11.99	1,7	0,3	-0,2	112,8	0,80	04.02.00	3,3	0,8	3,9	126,0	0,31
19.11.99	0,7	0,4	-1,1	111,5	0,52	05.02.00	1,8	0,3	3,9	109,4	1,71
20.11.99	0,3	0,5	-1,4	115,2	0,59	06.02.00	3,0	0,0	6,4	98,5	1,48
21.11.99	0,4	0,1	-3,4	106,3	0,95	07.02.00	4,8	5,7	5,4	115,2	0,89
22.11.99	2,9	0,0	-1,9	119,2	0,36	08.02.00	4,9	5,9	7,4	116,4	0,41
23.11.99	1,4	4,0	1,1	127,8	0,30	09.02.00	3,2	1,9	2,2	107,4	0,89
24.11.99	1,4	0,8	2,3	127,1	0,24	10.02.00	3,7	4,6	4,2	115,4	1,33
25.11.99	2,6	0,6	3,9	130,6	0,27	11.02.00	0,5	0,1	0,7	114,9	2,04
26.11.99	2,1	0,1	2,5	130,5	0,31	12.02.00	2,7	1,1	0,8	124,7	1,14
27.11.99	2,8	0,5	4,0	126,7	0,15	13.02.00	2,5	4,4	1,2	121,1	0,73
28.11.99	1,2	0,0	5,4	119,2	0,68	14.02.00	1,5	0,8	0,6	127,5	2,40
29.11.99	1,4	0,0	4,2	111,1	1,22	15.02.00	2,9	3,0	4,5	121,2	0,69
30.11.99	2,8	0,0	4,4	122,7	0,48	16.02.00	3,0	5,0	-0,2	117,4	1,00
01.12.99	4,4	1,5	6,4	125,1	0,17	17.02.00	2,2	1,7	-0,1	110,4	1,35
02.12.99	3,0	0,0	3,8	99,3	0,69	18.02.00	2,3	4,0	1,3	127,6	0,51
03.12.99	5,0	2,1	5,3	108,4	0,25	19.02.00	2,0	5,1	2,1	115,5	0,81
04.12.99	2,1	1,0	1,5	105,0	0,71	20.02.00	0,9	0,2	-0,3	103,2	1,89
05.12.99	1,6	0,2	-0,2	114,4	0,37	21.02.00	0,7	0,0	0,0	114,4	1,69
06.12.99	4,1	0,4	2,4	127,7	0,14	22.02.00	1,1	0,4	1,2	114,0	0,86
07.12.99	4,5	6,3	4,5	130,1	0,10	23.02.00	1,3	0,0	3,8	113,5	1,59
08.12.99	3,3	3,9	5,7	122,5	0,27	24.02.00	3,1	2,8	6,0	127,7	0,35
09.12.99	3,4	11,8	5,6	123,7	0,22	25.02.00	2,5	4,1	2,6	117,8	0,76
10.12.99	3,3	0,1	3,5	116,6	0,19	26.02.00	0,5	0,0	-0,9	113,9	2,27
16.12.99	1,2	0,0	-0,9	102,9	1,10	27.02.00	1,1	0,0	2,3	112,9	2,90
17.12.99	4,4	6,1	0,2	127,7	0,13	28.02.00	3,2	5,1	5,0	109,7	1,00
18.12.99	1,0	6,9	0,8	131,8	0,25	29.02.00	7,3	6,5	4,5	122,2	0,65
19.12.99	0,2	0,1	-1,5	120,1	0,16	01.03.00	3,8	9,1	4,7	121,4	0,61
20.12.99	0,4	1,5	-1,6	114,0	0,33	02.03.00	5,9	3,7	2,4	114,2	0,93
21.12.99	0,6	0,0	-5,3	119,4	0,50	03.03.00	8,1	0,2	2,1	103,1	1,68
22.12.99	0,6	0,0	-6,7	112,5	0,82	04.03.00	6,4	15,7	3,2	125,5	0,34
23.12.99	1,2	1,2	-0,5	122,8	0,19	05.03.00	3,9	2,0	-0,7	105,9	2,40
24.12.99	3,0	5,5	4,0	126,9	0,14	06.03.00	4,1	0,0	1,1	98,6	2,81
25.12.99	5,6	11,7	4,1	112,2	0,25	07.03.00	5,3	0,0	1,6	100,7	3,29
26.12.99	3,3	24,6	2,9	121,0	0,32	08.03.00	7,8	0,0	5,9	109,0	0,96
27.12.99	2,9	0,8	1,5	116,2	0,27	09.03.00	7,9	1,9	7,6	130,3	0,48
28.12.99	0,8	0,2	0,7	116,7	0,34	10.03.00	5,6	1,1	8,9	122,1	0,53
29.12.99	1,5	0,1	0,5	114,8	0,50	11.03.00	4,8	0,0	7,7	110,7	1,50
30.12.99	2,2	0,3	0,0	122,4	0,30	12.03.00	3,1	0,1	6,5	109,1	0,49
31.12.99	1,6	1,6	0,6	131,0	0,23	13.03.00	1,3	0,0	4,7	96,2	1,22
01.01.00	1,2	0,8	1,7	128,9	0,28	14.03.00	3,3	0,2	6,1	112,9	3,18
02.01.00	0,8	0,1	2,3	130,9	0,48	15.03.00	4,1	5,0	6,2	116,6	0,70
03.01.00	2,4	0,0	2,1	133,0	0,18	16.03.00	3,2	0,0	3,3	88,5	2,00

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
17.03.00	2,7	2,3	5,7	121,2	0,45	01.06.00					
18.03.00	1,9	0,4	6,4	107,0	1,18	02.06.00					
19.03.00	1,4	2,3	4,1	115,9	0,79	03.06.00					
20.03.00	1,4	0,0	1,8	117,4	0,92	04.06.00					
21.03.00	1,3	0,0	3,4	110,5	3,22	05.06.00					
22.03.00	1,6	0,0	4,5	99,4	3,94	06.06.00	3,4	0,0	12,4	98,5	3,51
23.03.00	1,7	0,0	5,0	104,8	3,90	07.06.00	2,6	0,0	11,1	93,5	6,07
24.03.00	2,3	0,0	6,8	100,0	3,04	08.06.00	2,2	0,0	15,3	92,3	7,63
25.03.00	3,7	4,4	7,4	122,2	0,76	09.06.00	2,2	0,0	21,3	90,9	7,26
26.03.00	3,7	1,3	7,7	120,3	1,38	10.06.00	1,8	0,0	18,3	99,6	4,10
27.03.00	2,3	11,2	4,0	120,0	2,64	11.06.00	1,7	3,0	13,7	110,2	3,20
28.03.00	1,4	4,0	4,5	121,1	1,69	12.06.00	1,7	0,0	15,4	101,8	7,71
29.03.00	2,9	0,1	2,2	115,7	0,62	13.06.00	2,0	0,0	19,2	98,1	6,44
30.03.00	2,5	0,2	4,7	110,0	0,85	14.06.00	2,8	0,0	19,2	98,5	6,84
31.03.00	2,6	9,8	4,9	131,6	0,63	15.06.00	2,5	0,0	14,8	99,5	2,94
01.04.00	3,4	1,2	2,3	126,7	1,08	16.06.00	1,8	0,0	11,7	96,4	6,85
02.04.00	2,3	3,0	4,2	124,0	1,09	17.06.00	1,5	0,0	12,8	84,8	7,77
03.04.00	1,7	0,3	6,8	102,6	3,60	20.06.00	2,3	0,0	22,3	90,7	7,25
04.04.00	2,1	2,6	7,8	104,3	1,59	21.06.00	3,7	4,1	20,6	97,2	6,30
05.04.00	2,1	0,5	7,7	110,0	2,61	22.06.00	4,5	1,8	15,8	101,7	5,76
06.04.00	2,6	0,0	2,7	112,5	0,76	23.06.00	3,9	1,4	14,6	100,7	2,93
07.04.00	5,0	0,0	2,1	72,8	5,66	24.06.00	2,9	8,1	10,9	109,1	2,52
11.04.00	6,7	4,4	8,2	93,4	2,71	25.06.00	2,2	1,2	11,1	110,4	3,23
12.04.00	6,3	5,3	3,5	112,2	2,49	26.06.00	1,9	0,0	10,3	96,5	4,56
13.04.00	5,2	6,8	4,8	114,5	1,73	27.06.00	2,0	0,0	11,5	92,3	7,16
14.04.00	4,4	1,6	5,2	123,7	1,46	28.06.00	2,1	0,0	11,1	93,7	7,48
15.04.00	4,7	3,4	6,1	114,9	2,12	29.06.00	2,0	0,0	13,7	92,0	7,06
16.04.00	4,9	0,0	7,6	91,8	4,75	30.06.00	2,1	0,8	15,0	105,0	3,32
17.04.00	4,5	1,8	8,3	107,4	2,01	01.07.00	2,3	5,2	17,9	109,6	4,51
18.04.00	3,2	0,0	8,4	103,2	2,50	02.07.00	2,2	5,8	17,6	112,2	5,30
19.04.00	2,7	0,0	8,3	112,4	3,40	03.07.00	2,6	0,1	15,9	115,2	4,61
20.04.00	2,3	0,0	9,5	105,6	5,61	04.07.00	3,9	20,8	14,7	125,0	2,24
21.04.00	2,5	0,0	11,2	102,7	4,12	05.07.00	3,2	3,4	14,0	113,2	3,80
22.04.00	2,8	0,0	13,8	98,4	5,08	06.07.00	1,9	0,0	16,3	103,6	5,56
23.04.00	2,5	5,4	11,9	121,1	3,61	07.07.00	2,8	4,8	14,3	114,8	2,20
24.04.00	2,1	3,9	8,3	114,6	2,87	08.07.00	4,8	3,5	11,1	105,8	3,46
25.04.00	2,8	0,0	11,6	98,3	5,99	09.07.00	6,6	21,6	12,5	123,6	1,24
26.04.00	2,7	0,0	14,0	94,3	6,17	10.07.00	6,1	5,6	12,2	113,9	4,43
27.04.00	2,2	0,0	17,2	92,5	5,06	11.07.00	4,1	1,2	11,2	117,7	1,71
28.04.00	2,0	0,5	15,6	107,6	4,29	12.07.00	3,5	1,7	10,1	104,6	3,31
29.04.00	1,5	0,1	11,9	129,3	0,67	13.07.00	3,5	2,9	11,8	131,2	1,21
30.04.00	1,5	0,0	12,9	118,0	2,56	14.07.00	3,0	6,3	10,7	113,7	2,46
01.05.00	2,0	0,0	14,3	112,6	3,87	15.07.00	2,4	1,4	10,9	105,5	3,87
02.05.00	2,0	0,0	14,2	114,6	4,45	16.07.00	1,6	2,0	11,4	113,3	2,50
03.05.00	1,4	0,0	13,7	117,4	2,57	17.07.00	1,7	0,0	12,5	107,4	2,88
04.05.00	1,6	0,0	13,7	122,1	2,48	18.07.00	1,9	0,0	13,1	101,9	4,10
05.05.00	2,1	0,0	15,7	102,3	5,44	19.07.00	1,7	0,0	13,4	106,2	2,26
06.05.00	1,9	0,0	16,2	96,7	5,17	20.07.00	1,8	0,0	13,7	108,4	3,84
07.05.00	1,5	0,0	16,2	95,7	5,54	21.07.00	2,1	0,0	14,6	94,7	6,80
08.05.00	1,3	13,0	14,4	117,0	3,76	22.07.00	1,9	0,0	13,6	101,5	6,94
09.05.00	1,4	0,0	17,4	100,1	5,69	23.07.00	2,5	0,0	15,8	105,4	6,06
10.05.00	1,9	8,8	17,1	112,2	4,28	24.07.00	3,8	11,4	16,7	114,7	3,20
11.05.00	1,9	30,4	17,8	109,6	4,00	25.07.00	3,1	3,9	13,7	123,9	1,53
12.05.00	1,6	4,0	15,1	131,9	2,02	26.07.00	1,7	2,0	14,4	127,2	1,52
13.05.00	1,7	0,0	15,7	101,7	5,83	27.07.00	2,2	4,4	13,9	125,8	1,90
14.05.00	1,9	0,0	15,8	97,5	6,98	28.07.00	2,6	1,9	14,4	113,9	3,86
15.05.00	2,3	0,0	17,3	89,6	6,42	29.07.00	2,5	1,7	13,7	121,6	2,89
16.05.00	3,4	0,0	18,0	96,9	6,27	30.07.00	2,0	0,0	15,2	110,4	3,56
17.05.00	4,4	5,6	13,1	111,1	3,15	31.07.00	1,8	0,0	15,6	110,3	4,28
18.05.00	5,1	1,9	9,1	113,6	2,85	01.08.00	2,7	0,0	18,4	100,2	6,76
19.05.00	4,5	4,2	7,5	119,1	1,90	02.08.00	2,6	2,5	15,3	109,6	5,01
20.05.00	3,1	0,7	8,3	111,1	3,71	03.08.00	1,6	6,6	14,1	112,7	4,27
21.05.00	3,1	5,4	8,7	118,8	2,41	04.08.00	1,5	0,1	15,0	105,5	5,14
22.05.00	3,2	0,5	9,8	114,0	2,17	05.08.00	1,5	0,0	15,9	100,2	5,08
23.05.00						06.08.00	1,4	0,3	15,7	103,6	3,92
24.05.00						07.08.00	1,4	0,1	16,9	105,6	3,44
25.05.00						08.08.00	1,6	0,1	16,7	108,7	3,65
26.05.00						09.08.00	2,4	0,0	16,7	110,3	4,92
27.05.00						10.08.00	2,3	0,0	17,5	106,5	4,96
28.05.00						11.08.00	1,6	0,0	15,7	106,6	5,51
29.05.00						12.08.00	1,5	0,0	18,2	99,7	5,34
30.05.00						13.08.00	2,0	0,0	18,1	97,4	5,48
31.05.00						14.08.00	2,9	0,0	19,6	103,7	4,27

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
15.08.00	2,9	0,0	18,5	112,4	4,28	27.10.00	5,0	1,0	8,7	115,4	0,35
16.08.00	3,0	0,0	17,4	108,7	4,90	28.10.00	5,5	0,0	8,9	121,4	0,57
17.08.00	2,4	0,0	18,5	104,4	3,90	29.10.00	8,3	1,4	8,7	103,2	0,97
18.08.00	1,9	0,2	17,7	109,2	3,59	30.10.00	7,9	12,4	8,0	103,0	0,57
19.08.00	2,0	13,6	18,1	124,7	2,32	31.10.00	5,9	5,5	6,3	118,9	0,29
20.08.00	2,1	27,4	16,7	128,9	1,82	01.11.00	4,8	8,6	5,7	121,5	0,42
21.08.00	2,1	0,0	15,1	108,5	3,52	02.11.00	3,7	6,0	8,3	121,0	0,61
22.08.00	1,7	0,0	13,7	103,7	4,03	03.11.00	3,8	2,7	6,5	124,9	0,53
23.08.00	1,6	0,0	14,8	98,1	3,78	04.11.00	3,5	1,0	5,4	118,3	0,72
24.08.00	1,5	0,0	16,0	99,4	4,99	05.11.00	2,8	0,0	4,7	111,0	0,67
25.08.00	1,8	0,0	15,6	98,1	5,09	06.11.00	3,7	10,8	7,0	108,1	0,54
26.08.00	2,2	0,0	18,0	96,0	4,07	07.11.00	5,9	9,2	6,3	118,3	0,37
27.08.00	2,2	10,9	15,5	119,2	2,26	08.11.00	6,4	5,5	5,6	120,2	0,20
28.08.00	1,9	2,3	13,1	121,5	3,24	09.11.00	5,1	4,9	5,5	119,7	0,48
29.08.00	1,6	0,0	14,1	109,8	4,01	10.11.00	4,3	0,0	3,3	118,7	1,04
30.08.00	1,3	0,0	14,1	101,0	3,69	11.11.00	4,0	0,0	4,3	116,8	0,55
31.08.00	2,2	0,0	14,0	102,0	3,77	12.11.00	3,3	9,3	8,3	109,4	0,86
01.09.00	3,8	2,4	13,6	124,6	1,41	13.11.00	2,7	6,3	6,7	129,1	0,34
02.09.00	3,5	10,8	12,4	121,6	1,14	14.11.00	3,8	0,8	5,5	124,9	0,53
03.09.00	2,0	0,0	11,4	105,4	1,76	15.11.00	4,7	1,6	4,8	122,0	0,30
04.09.00	1,7	3,8	11,1	112,6	1,98	16.11.00	4,0	0,0	5,6	113,6	0,71
05.09.00	2,9	0,0	10,6	113,9	2,52	17.11.00	4,2	1,2	2,5	120,0	0,59
06.09.00	3,3	10,4	12,4	126,5	1,08	18.11.00	4,8	0,0	4,0	113,6	0,31
07.09.00	2,6	0,0	12,6	102,0	2,64	19.11.00	4,5	3,2	5,3	126,5	0,18
08.09.00	1,5	0,0	15,0	111,4	2,67	20.11.00	3,6	4,3	3,3	120,1	0,25
09.09.00	0,9	0,0	14,2	117,8	1,65	21.11.00	3,5	4,1	4,5	117,2	0,41
10.09.00	1,3	0,0	15,8	115,0	4,02	22.11.00	2,9	4,7	6,2	123,6	0,25
11.09.00	1,3	0,0	16,2	112,7	3,80	23.11.00	2,8	5,4	7,4	130,3	0,11
12.09.00	1,9	0,1	17,3	116,2	3,15	24.11.00	3,2	0,5	4,3	117,2	0,53
13.09.00	1,9	0,7	14,5	114,0	3,89	25.11.00	4,0	0,1	3,4	116,2	0,57
14.09.00	1,2	0,0	13,3	122,5	1,71	26.11.00	4,5	6,9	5,1	119,8	0,36
15.09.00	3,5	6,5	16,3	116,1	2,78	27.11.00	3,0	0,4	4,4	120,0	0,30
16.09.00	4,1	20,7	11,8	124,4	0,58	28.11.00	1,8	2,0	7,3	128,9	0,19
17.09.00	2,0	2,3	12,7	127,9	0,58	29.11.00	0,9	0,0	8,3	124,3	0,82
18.09.00	1,8	0,0	11,9	120,9	1,93	30.11.00	1,7	0,0	7,0	127,7	0,44
19.09.00	1,5	0,0	13,8	113,9	3,32	01.12.00	2,4	4,1	9,0	117,6	0,79
20.09.00	1,7	19,9	12,6	125,2	0,45	02.12.00	3,3	1,5	9,2	129,0	0,49
21.09.00	1,8	1,5	11,0	110,1	2,76	03.12.00	3,1	0,4	6,1	118,7	0,19
22.09.00	1,7	0,1	11,1	124,3	1,53	04.12.00	2,4	0,7	5,1	120,5	0,60
23.09.00	1,8	0,0	11,2	114,0	2,85	05.12.00					
24.09.00	1,4	0,0	11,8	109,4	3,50	06.12.00					
25.09.00	1,4	0,7	13,0	114,2	3,40	07.12.00					
26.09.00	1,9	0,0	13,5	117,8	3,51	08.12.00					
27.09.00	1,9	0,0	14,1	122,6	1,04	09.12.00					
28.09.00	1,3	17,9	14,3	132,6	0,64	10.12.00					
29.09.00	1,2	0,0	15,2	120,2	2,72	11.12.00					
30.09.00	1,6	10,1	12,9	127,5	1,01	12.12.00					
01.10.00	2,2	19,6	11,2	123,7	1,04	13.12.00					
02.10.00	2,0	2,6	10,5	122,8	1,44	14.12.00					
03.10.00	1,6	0,0	10,0	119,2	1,77	15.12.00					
04.10.00	1,8	0,0	9,8	118,3	2,71	16.12.00					
05.10.00	2,0	0,9	10,7	118,5	1,48	17.12.00					
06.10.00	2,0	0,0	6,6	110,4	2,33	18.12.00					
07.10.00	1,9	0,0	4,5	115,3	3,24	19.12.00	3,5	0,0	2,0	127,4	0,18
08.10.00	2,1	7,2	7,1	126,0	0,46	20.12.00	2,6	0,0	-0,8	115,6	0,22
09.10.00	4,1	1,8	7,8	114,1	1,64	21.12.00	2,5	0,0	-3,0	97,9	1,06
10.10.00	5,3	10,4	6,9	113,8	1,05	22.12.00	1,7	0,0	-5,3	107,1	0,87
11.10.00	3,9	11,5	8,9	112,6	1,43	23.12.00	1,9	0,0	-1,1	111,7	0,84
12.10.00	2,5	0,0	9,2	107,5	1,38	24.12.00	2,2	0,3	2,4	110,5	0,31
13.10.00	1,5	0,0	8,7	113,9	1,18	25.12.00	1,8	0,3	0,7	128,0	0,16
14.10.00	1,3	0,0	9,5	116,0	2,12	26.12.00	1,8	0,9	0,0	128,5	0,18
15.10.00	3,1	0,0	11,5	130,9	0,71	27.12.00	3,4	11,1	3,2	127,5	0,14
16.10.00	4,0	1,1	11,5	115,3	1,69	28.12.00	3,9	0,4	-0,1	119,5	0,32
17.10.00	2,1	0,9	6,9	112,8	2,31	29.12.00	3,0	0,0	-0,4	121,1	0,51
18.10.00	1,4	0,2	8,0	118,7	0,97	30.12.00	2,9	0,0	-1,0	119,0	0,25
19.10.00	1,4	4,8	9,3	129,8	0,35	31.12.00	1,2	0,1	-1,5	116,1	0,30
20.10.00	0,9	0,0	10,1	128,1	0,65	01.01.01	1,3	4,7	1,4	116,8	0,23
21.10.00	0,7	0,0	9,6	124,5	1,23	02.01.01	2,4	3,4	7,1	121,8	0,40
22.10.00	1,3	0,0	9,6	118,8	2,33	03.01.01	2,7	3,7	2,5	119,3	0,36
23.10.00	3,5	0,9	10,0	127,7	1,12	04.01.01	2,2	8,7	5,0	120,6	0,14
24.10.00	6,3	0,1	9,6	106,9	1,39	05.01.01	3,8	21,2	7,1	128,0	0,11
25.10.00	6,1	0,1	10,8	114,4	0,24	06.01.01	3,4	11,8	5,0	117,7	0,34
26.10.00	5,2	0,2	8,6	103,8	1,04	07.01.01	1,9	0,6	3,9	122,8	0,30

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
08.01.01	1,4	0,0	1,8	120,4	0,73	22.03.01	1,7	13,8	6,7	123,8	1,17
09.01.01	1,6	0,1	1,1	123,0	0,25	23.03.01	1,9	9,5	8,1	127,3	0,72
10.01.01	0,6	5,9	1,3	125,5	0,25	24.03.01	1,3	6,9	9,4	120,6	2,17
11.01.01	1,5	0,4	1,2	129,3	0,12	25.03.01	1,4	3,1	3,6	129,7	0,86
12.01.01	1,9	0,0	-1,1	105,7	1,11	26.03.01	0,8	0,0	1,2	110,0	0,98
13.01.01	2,2	0,0	-2,2	92,4	1,18	27.03.01	1,2	0,0	1,5	103,0	3,03
14.01.01	2,0	0,0	-2,4	83,0	1,28	28.03.01	1,5	4,5	4,9	120,9	1,37
15.01.01	1,4	0,0	-3,9	83,5	1,22	29.03.01	2,9	10,3	5,2	116,6	1,83
16.01.01	0,9	0,0	-5,9	97,2	1,44	30.03.01	1,1	0,0	4,3	112,3	2,24
17.01.01	0,7	0,0	-4,9	108,8	1,40	31.03.01	1,6	0,0	5,0	107,0	3,75
18.01.01	0,4	0,0	-0,6	119,0	0,21	01.04.01	0,7	0,0	7,5	107,3	4,88
19.01.01	0,4	0,7	0,0	120,4	0,69	02.04.01	1,0	0,0	9,6	100,5	4,85
20.01.01	0,2	0,1	-0,5	126,8	0,17	03.04.01	1,9	2,7	8,6	111,4	2,37
21.01.01	0,0	0,0	-2,5	118,0	0,30	04.04.01	2,1	5,5	5,8	120,0	1,73
22.01.01	1,2	12,0	1,3	128,8	0,31	05.04.01	3,1	1,7	4,7	109,8	2,90
23.01.01	2,6	5,9	5,8	129,1	0,34	06.04.01	3,3	6,7	8,4	126,4	1,73
24.01.01	2,7	8,6	5,4	124,9	0,31	07.04.01	2,5	3,4	7,0	102,2	3,17
25.01.01	1,6	3,2	4,1	127,5	0,44	08.04.01	1,0	2,0	6,0	105,1	2,81
26.01.01	2,2	4,2	2,3	125,0	0,33	09.04.01	1,4	1,5	5,9	129,5	0,76
27.01.01	3,3	5,6	1,5	116,6	0,56	10.04.01	1,5	10,0	6,5	120,4	2,05
28.01.01	1,0	0,0	0,0	120,1	0,56	11.04.01	0,7	0,0	7,0	111,4	2,71
29.01.01	0,2	0,0	0,9	123,9	0,68	12.04.01	1,0	0,0	4,1	93,4	3,46
30.01.01	0,3	0,1	-2,1	119,1	1,39	13.04.01	1,0	0,0	0,8	95,0	3,82
31.01.01	0,4	0,0	-0,9	113,8	1,14	14.04.01	1,6	0,0	0,3	88,4	3,52
01.02.01	0,6	0,0	-1,3	106,9	1,39	15.04.01	2,5	3,9	4,4	121,3	2,31
02.02.01	1,5	0,0	-2,2	118,2	0,66	16.04.01	1,2	3,6	4,1	112,7	3,65
03.02.01	2,3	6,9	2,0	129,0	0,36	17.04.01	1,0	1,1	4,0	108,4	2,21
04.02.01	2,4	4,8	5,3	128,0	0,27	18.04.01	2,4	1,8	2,0	113,9	2,62
05.02.01	4,8	18,3	6,6	120,9	0,44	19.04.01	2,1	0,4	1,1	114,7	4,06
06.02.01	3,4	5,7	8,5	119,4	0,95	20.04.01	1,3	0,0	1,5	111,9	3,76
07.02.01	2,1	3,4	8,2	126,9	0,53	21.04.01	0,9	0,5	3,0	109,8	4,34
08.02.01	3,6	0,0	8,3	91,4	1,30	22.04.01	0,8	0,0	5,2	96,3	3,75
09.02.01	1,5	0,0	1,8	103,7	0,65	23.04.01	0,7	0,0	7,1	88,9	3,18
10.02.01	1,3	0,0	1,5	105,7	1,87	24.04.01	0,2	1,6	8,4	108,7	4,05
11.02.01	3,0	0,0	4,6	124,7	0,86	25.04.01	1,2	2,6	7,5	130,6	1,57
12.02.01	2,2	0,2	7,3	124,6	1,01	26.04.01	3,8	3,0	7,1	122,5	2,40
13.02.01	1,0	3,8	3,9	114,0	1,97	27.04.01	0,6	1,5	8,0	130,0	1,98
14.02.01	1,4	0,0	2,5	109,6	1,66	28.04.01	0,5	2,5	8,3	134,1	1,21
15.02.01	0,7	0,0	2,8	104,9	1,85	29.04.01	2,6	2,0	10,5	122,6	2,93
16.02.01	0,9	0,2	3,2	111,1	2,00	30.04.01	1,6	0,8	13,6	112,1	4,17
17.02.01	0,8	1,4	2,0	120,2	0,44	01.05.01	0,3	1,3	13,2	110,1	3,97
18.02.01	0,9	0,0	1,1	106,0	1,37	02.05.01	0,4	1,7	17,2	105,3	5,51
19.02.01	0,7	0,0	1,8	103,6	1,57	03.05.01	0,9	2,0	12,2	117,2	3,00
20.02.01	0,9	0,0	3,1	104,3	1,15	04.05.01	0,3	1,1	10,1	121,1	4,34
21.02.01	2,4	0,1	3,5	116,4	0,93	05.05.01	1,3	1,2	7,6	113,1	3,01
22.02.01	2,1	0,9	3,0	106,0	1,11	06.05.01	1,1	1,1	7,4	107,0	2,41
23.02.01	1,4	3,2	-1,1	113,6	1,63	07.05.01	0,9	1,3	9,0	111,1	1,48
24.02.01	0,7	1,6	-4,9	115,5	0,90	08.05.01	0,9	1,2	11,1	102,1	3,73
25.02.01	0,8	0,7	-5,2	96,2	2,70	09.05.01	0,3	1,2	15,4	105,9	5,16
26.02.01	2,0	0,0	-2,0	112,7	1,57	10.05.01	0,7	1,3	16,6	85,9	6,80
27.02.01	0,9	1,3	0,2	95,1	1,74	11.05.01	0,2	0,9	15,5	93,7	6,43
28.02.01	0,7	1,5	0,5	100,1	1,50	12.05.01	0,3	1,1	15,4	89,7	6,88
01.03.01	2,2	1,4	-0,1	126,7	0,60	13.05.01	1,0	1,1	15,2	86,5	6,15
02.03.01	1,7	2,9	-0,5	114,3	1,48	14.05.01	0,7	1,1	14,7	116,1	4,00
03.03.01	0,9	0,2	-0,9	104,1	2,65	15.05.01	2,5	1,8	13,0	113,2	3,66
04.03.01	1,2	5,1	0,9	129,6	0,72	16.05.01	1,2	2,5	12,9	116,4	4,98
05.03.01	0,7	0,0	0,3	108,3	1,23	17.05.01	0,6	2,4	10,5	118,9	3,32
06.03.01	1,1	0,0	2,2	104,2	2,73	18.05.01	0,8	1,7	8,8	128,3	2,27
07.03.01	0,7	5,4	4,1	125,5	0,59	19.05.01	0,8	1,0	10,0	107,6	3,46
08.03.01	1,4	2,6	6,9	130,6	0,28	20.05.01	0,9	1,0	12,1	103,7	7,32
09.03.01	2,9	2,3	6,9	132,7	0,50	21.05.01	0,7	1,2	13,6	96,3	7,12
10.03.01	2,7	6,5	8,1	134,9	0,47	22.05.01	1,0	1,4	12,3	95,4	6,42
11.03.01	2,8	10,2	9,7	133,7	0,61	23.05.01	0,7	1,1	14,1	94,4	7,03
12.03.01	2,0	4,9	6,7	124,6	0,87	24.05.01	0,4	0,8	16,4	93,6	6,55
13.03.01	3,6	6,1	3,8	114,3	1,11	25.05.01	0,4	0,8	16,3	93,9	6,88
14.03.01	2,4	2,2	3,9	114,5	1,63	26.05.01	0,6	1,0	17,6	92,8	6,21
15.03.01	1,0	5,6	6,7	123,5	1,97	27.05.01	0,8	1,3	18,4	106,5	5,20
16.03.01	0,9	0,1	9,1	114,2	2,58	28.05.01	0,4	1,9	19,2	107,4	5,39
17.03.01	1,4	1,6	7,5	118,7	1,96	29.05.01	2,0	1,7	16,9	89,8	6,53
18.03.01	3,0	7,6	6,8	121,6	0,76	30.05.01	0,3	1,0	16,3	91,3	6,59
19.03.01	2,9	1,0	1,0	107,4	3,13	31.05.01	0,7	1,5	13,3	95,9	6,10
20.03.01	1,3	0,0	-1,0	106,3	1,80	01.06.01	1,6	0,0	12,2	94,2	4,63
21.03.01	1,2	9,8	3,2	131,6	0,78	02.06.01	2,4	1,6	9,5	130,8	1,45

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
03.06.01	1,8	1,9	7,4	109,9	4,64	15.08.01	1,0	0,0	21,1	105,8	5,56
04.06.01	1,6	0,0	10,3	98,1	2,66	16.08.01	1,6	1,6	18,3	113,8	2,80
05.06.01	1,1	0,0	13,3	102,0	6,53	17.08.01	0,7	0,1	16,7	112,3	4,24
06.06.01	1,8	0,0	15,0	102,5	5,41	18.08.01	0,8	0,0	19,0	106,1	3,17
07.06.01	2,2	5,2	12,4	118,6	2,58	19.08.01	1,7	3,3	16,7	115,9	3,22
08.06.01	1,3	5,7	9,7	126,1	3,14	20.08.01	0,6	0,0	17,9	105,5	4,01
09.06.01	0,7	2,2	11,7	107,3	5,11	21.08.01	0,8	0,0	18,0	103,0	4,74
10.06.01	0,7	4,1	10,9	113,4	4,14	22.08.01	0,9	0,0	18,5	105,3	5,79
11.06.01	1,2	2,6	8,8	114,2	3,57	23.08.01	0,7	0,0	19,3	109,7	3,97
12.06.01	1,5	0,0	11,8	103,1	5,74	24.08.01	0,7	0,0	20,2	106,9	4,34
13.06.01	0,7	0,0	14,0	99,5	6,16	25.08.01	0,6	0,0	20,9	101,6	4,61
14.06.01	0,6	0,0	15,4	110,1	3,93	26.08.01	0,7	0,0	21,1	100,0	4,83
15.06.01	1,4	5,8	15,3	122,7	4,26	27.08.01	1,1	0,0	14,9	107,3	2,35
16.06.01	1,7	6,1	13,4	123,6	5,41	28.08.01	0,9	0,0	13,3	95,7	5,33
17.06.01	2,0	12,5	12,9	134,1	3,46	29.08.01	1,1	0,0	14,0	92,2	4,75
18.06.01	1,3	0,6	12,2	120,3	3,33	30.08.01	0,7	0,0	14,3	95,4	1,74
19.06.01	1,0	0,0	10,8	101,3	7,33	31.08.01	1,1	1,7	12,2	127,0	1,83
20.06.01	1,0	0,0	13,7	103,6	6,77	01.09.01	0,9	0,1	12,7	116,1	1,66
21.06.01	1,4	0,0	15,4	98,8	6,99	02.09.01	1,9	0,0	13,5	110,9	3,84
22.06.01	1,1	0,0	12,1	105,8	3,68	03.09.01	2,2	6,2	14,3	131,5	1,44
23.06.01	0,8	0,0	14,4	104,1	7,87	04.09.01	1,5	3,5	11,7	121,8	1,75
24.06.01	0,9	0,0	17,4	101,9	6,06	05.09.01	1,6	3,9	10,9	115,9	2,09
25.06.01	0,8	0,0	19,0	100,1	7,16	06.09.01	1,8	6,1	11,2	138,1	0,69
26.06.01	0,9	0,0	19,9	85,9	7,20	07.09.01	1,9	0,3	12,5	120,7	1,23
27.06.01	0,9	4,7	18,2	121,6	3,96	08.09.01	2,3	1,5	11,7	105,7	2,84
28.06.01	1,3	3,0	16,7	110,8	6,04	09.09.01	2,4	1,9	8,5	109,7	2,70
29.06.01	0,9	0,0	17,8	117,1	4,14	10.09.01	1,9	1,3	9,7	117,5	1,49
30.06.01	1,0	7,9	17,5	125,2	4,61	11.09.01	2,1	0,8	10,3	111,6	3,21
01.07.01	1,0	0,0	16,6	109,9	5,32	12.09.01	1,5	1,1	12,0	124,0	0,83
02.07.01	0,7	0,0	16,8	113,3	4,48	13.09.01	2,5	5,5	11,7	127,4	1,25
03.07.01	1,0	0,0	18,5	94,2	7,26	14.09.01	1,4	1,7	10,0	111,8	2,74
04.07.01	1,2	0,0	19,2	82,0	7,70	15.09.01	2,0	1,4	9,4	127,0	1,09
05.07.01	0,8	0,0	22,2	84,1	6,77	16.09.01	1,3	3,9	8,6	116,2	2,63
06.07.01	0,9	10,5	22,7	88,0	6,11	17.09.01	0,8	0,3	8,3	111,4	1,84
07.07.01	2,4	3,1	16,8	127,1	3,66	18.09.01	1,1	0,0	9,0	116,7	1,69
08.07.01	2,8	0,1	16,0	123,7	3,08	19.09.01	1,8	18,6	9,7	129,2	0,34
09.07.01	1,4	0,0	15,3	111,4	4,06	20.09.01	2,9	7,7	10,9	125,2	0,72
10.07.01	2,1	0,0	19,0	99,5	5,78	21.09.01	1,8	0,4	9,6	119,0	1,57
11.07.01	2,7	4,7	13,6	111,1	4,70	22.09.01	0,7	0,0	7,9	114,2	3,09
12.07.01	1,9	3,5	13,1	114,0	4,00	23.09.01	0,6	0,0	7,8	115,0	3,50
13.07.01	1,6	7,8	13,4	121,7	3,80	24.09.01	0,6	0,2	8,8	121,4	2,50
14.07.01	1,6	16,2	14,5	138,8	1,74	25.09.01	0,6	0,1	9,6	128,3	1,64
15.07.01	0,9	0,0	14,2	107,5	4,44	26.09.01	1,1	2,7	10,5	124,6	2,58
16.07.01	0,6	17,4	12,4	128,6	2,11	27.09.01	2,0	1,3	11,7	127,8	1,29
17.07.01	0,7	3,3	14,8	116,2	5,12	28.09.01	0,7	0,0	10,4	124,1	3,29
18.07.01	2,4	4,9	14,2	112,9	5,86	29.09.01	1,1	1,7	11,7	128,3	1,99
19.07.01	2,3	8,0	13,7	133,1	2,51	30.09.01	1,6	1,1	13,4	115,6	3,53
20.07.01	1,9	0,4	12,9	128,7	1,81	01.10.01	2,8	12,7	15,2	133,0	0,40
21.07.01	1,7	0,0	15,2	114,1	4,45	02.10.01	2,7	0,1	18,9	111,5	2,38
22.07.01	0,6	0,0	17,9	108,9	5,72	03.10.01	1,4	15,2	13,5	130,7	0,90
23.07.01	0,7	0,0	19,3	109,1	5,42	04.10.01	1,6	0,0	10,1	118,4	2,14
24.07.01	0,7	0,0	20,1	107,2	5,90	05.10.01	0,7	0,0	10,5	120,9	2,85
25.07.01	0,7	0,0	20,4	101,6	5,87	06.10.01	1,2	2,8	14,7	124,0	1,69
26.07.01	0,6	0,0	20,9	103,6	5,41	07.10.01	1,7	0,2	13,2	122,7	1,31
27.07.01	0,7	0,0	21,5	101,2	6,10	08.10.01	2,6	1,2	10,3	117,2	1,02
28.07.01	0,6	3,1	19,2	117,7	4,29	09.10.01	2,7	0,0	11,3	111,9	1,24
29.07.01	0,8	0,0	18,7	105,2	5,88	10.10.01	1,7	0,0	11,3	123,9	1,40
30.07.01	0,9	0,0	20,1	106,6	5,75	11.10.01	1,7	0,0	10,2	125,1	2,41
31.07.01	1,4	0,0	21,5	106,4	5,16	12.10.01	0,5	0,0	10,7	120,0	2,56
01.08.01	1,0	0,0	17,3	93,7	7,00	13.10.01	0,2	0,0	13,4	122,4	2,00
02.08.01	0,9	0,3	21,7	97,8	3,96	14.10.01	0,7	0,4	12,3	129,6	1,86
03.08.01	1,9	0,3	17,8	116,4	2,28	15.10.01	0,5	1,2	15,3	125,9	1,97
04.08.01	1,5	6,7	14,9	125,3	3,84	16.10.01	0,4	0,1	11,0	126,1	1,62
05.08.01	1,9	5,2	13,2	123,6	2,11	17.10.01	0,6	0,0	10,8	133,2	0,72
06.08.01	2,1	4,8	15,9	135,7	1,58	18.10.01	0,5	1,1	13,4	127,5	1,54
07.08.01	2,5	2,2	15,8	131,5	2,04	19.10.01	0,6	0,2	13,2	118,7	1,90
08.08.01	2,9	12,4	14,3	117,6	2,72	20.10.01	0,7	0,0	10,9	111,3	1,70
09.08.01	1,8	4,0	14,2	119,2	3,18	21.10.01	1,3	1,0	10,3	124,8	0,68
10.08.01	1,4	0,4	12,5	119,5	2,90	22.10.01	1,4	0,0	10,0	122,8	1,05
11.08.01	1,0	0,0	12,4	114,1	3,75	23.10.01	0,6	7,0	10,5	131,5	0,90
12.08.01	1,5	0,0	16,5	102,0	4,88	24.10.01	1,7	4,4	11,2	130,8	0,77
13.08.01	2,0	0,0	17,8	98,0	5,24	25.10.01	1,5	0,5	11,4	126,6	0,95
14.08.01	0,7	0,0	19,6	108,7	5,77	26.10.01	1,0	0,0	11,1	123,8	1,15

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
27.10.01	1,8	1,1	10,7	131,0	0,63	08.01.02	1,1	0,2	-2,3	121,2	0,81
28.10.01	0,5	0,0	10,5	128,5	0,83	09.01.02	0,5	0,0	-9,3	120,5	1,12
29.10.01	1,7	0,0	9,6	121,6	1,08	10.01.02	0,4	0,0	-8,5	117,9	1,15
30.10.01	3,1	0,0	12,0	114,9	1,41	11.01.02	1,2	0,0	-2,4	127,1	0,42
31.10.01	2,2	2,6	8,3	107,0	0,59	12.01.02	0,8	1,4	-0,7	133,5	0,67
01.11.01	0,9	0,1	5,8	110,2	1,55	13.01.02	0,2	2,4	-4,4	119,8	1,32
02.11.01	0,6	0,0	5,1	119,7	1,91	14.01.02	0,7	0,0	-3,4	131,2	0,42
03.11.01	0,6	0,0	5,4	117,7	1,50	15.01.02	0,5	0,0	-3,2	132,2	0,48
04.11.01	0,7	0,0	6,3	119,9	1,70	16.01.02	0,5	0,6	-0,9	132,5	0,29
05.11.01	0,6	0,0	3,9	111,9	1,25	17.01.02	2,1	0,0	-0,7	132,2	0,30
06.11.01	2,5	2,5	5,8	131,5	0,18	18.01.02	2,1	0,0	-0,8	131,5	0,37
07.11.01	2,4	3,9	8,6	122,9	0,39	19.01.02	3,1	4,7	2,4	130,8	0,17
08.11.01	3,1	28,3	4,4	115,2	0,46	20.01.02	3,7	4,7	4,2	139,3	0,20
09.11.01	0,9	0,1	0,3	110,5	1,22	21.01.02	3,6	0,3	5,7	139,3	0,17
10.11.01	0,7	0,0	-1,5	105,9	1,56	22.01.02	2,5	0,5	4,1	127,5	0,31
11.11.01	0,5	0,0	1,4	107,5	1,61	23.01.02	2,8	5,1	5,5	129,0	0,93
12.11.01	0,7	0,2	5,3	127,7	0,50	24.01.02	4,2	3,1	6,4	134,5	0,31
13.11.01	0,7	0,5	3,5	112,4	1,22	25.01.02	2,5	0,5	3,6	117,9	1,01
14.11.01	0,7	0,5	0,8	115,2	0,62	26.01.02	5,9	2,9	8,3	121,8	0,25
15.11.01	1,0	0,0	-0,7	106,0	1,47	27.01.02	5,4	19,9	10,2	141,0	0,25
16.11.01	0,6	0,0	3,7	119,8	0,64	28.01.02	5,1	1,1	8,8	122,9	0,40
17.11.01	1,3	0,0	2,8	113,1	0,99	29.01.02	3,7	0,0	7,5	126,5	1,16
18.11.01	1,4	0,0	0,5	116,6	0,64	30.01.02	2,1	0,0	8,1	128,6	1,22
19.11.01	0,7	0,0	3,5	118,2	0,44	31.01.02	3,3	0,0	7,1	108,6	1,22
20.11.01	0,3	0,0	4,7	118,2	0,31	01.02.02	3,6	0,3	7,3	133,2	0,36
21.11.01	1,7	0,0	4,3	107,9	0,44	02.02.02	1,2	0,0	5,9	115,6	1,70
22.11.01	3,5	7,7	2,2	116,7	0,14	03.02.02	1,2	0,0	8,4	96,8	1,27
23.11.01	1,2	0,5	1,3	109,3	0,92	04.02.02	4,0	0,1	7,1	93,3	0,96
24.11.01	1,8	2,0	1,8	127,0	0,23	05.02.02	3,7	3,9	8,2	125,8	0,21
25.11.01	1,1	2,5	5,6	128,5	0,23	06.02.02	2,0	1,0	4,4	127,6	0,75
26.11.01	1,0	7,3	5,1	133,9	0,25	07.02.02	1,8	0,3	4,2	121,8	0,85
27.11.01	1,3	2,3	3,0	124,9	0,37	08.02.02	3,3	3,7	5,5	134,8	0,20
28.11.01	1,7	4,9	3,1	125,2	0,58	09.02.02	3,6	17,3	7,0	135,4	0,20
29.11.01	2,8	5,8	4,9	132,2	0,17	10.02.02	3,8	4,1	5,2	121,8	1,20
30.11.01	1,4	6,1	8,6	132,7	0,30	11.02.02	5,0	3,9	7,9	135,8	0,21
01.12.01	2,0	5,0	9,4	133,7	0,21	12.02.02	4,8	7,6	9,8	136,6	0,34
02.12.01	0,4	1,7	8,0	136,1	0,21	13.02.02	0,9	21,8	4,7	138,2	0,49
03.12.01	0,4	0,3	6,4	135,7	0,15	14.02.02	2,6	3,2	1,2	107,4	2,14
04.12.01	2,2	6,6	5,9	132,8	0,14	15.02.02	1,3	0,0	1,1	80,4	2,45
05.12.01	2,7	2,1	6,7	129,8	0,21	16.02.02	1,3	0,0	1,0	76,0	2,06
06.12.01	1,7	0,7	4,5	109,5	0,33	17.02.02	1,0	0,0	0,2	113,5	2,24
07.12.01	0,8	0,0	1,1	120,7	0,93	18.02.02	1,8	2,4	1,1	129,6	0,67
08.12.01	1,2	0,0	1,0	111,6	0,88	19.02.02	3,6	3,5	2,8	132,6	0,36
09.12.01	1,4	0,0	-1,3	107,5	1,08	20.02.02	4,1	17,5	3,9	127,0	0,60
10.12.01	0,9	0,0	0,2	89,8	1,11	21.02.02	1,1	2,3	-1,2	102,0	2,34
11.12.01	0,6	0,0	0,1	112,3	0,95	22.02.02	4,5	4,6	3,4	118,5	0,35
12.12.01	0,9	0,0	1,8	129,7	0,44	23.02.02	4,2	3,1	1,5	107,7	1,22
13.12.01	1,8	0,0	-2,8	94,9	0,59	24.02.02	2,9	2,1	0,6	117,3	1,86
14.12.01	1,9	0,0	-6,2	88,0	1,11	25.02.02	3,8	4,7	6,7	134,1	0,63
15.12.01	1,4	0,0	-2,3	90,0	0,50	26.02.02	5,3	18,9	8,2	121,9	0,93
16.12.01	1,6	0,0	-4,0	99,5	0,53	27.02.02	4,1	14,1	4,4	104,6	1,89
17.12.01	0,5	0,0	-1,9	128,0	0,28	28.02.02	3,9	1,5	2,8	110,1	1,66
18.12.01	0,4	0,0	-0,5	126,3	0,56	01.03.02	2,1	0,0	3,3	107,2	1,72
19.12.01	1,4	0,5	0,7	131,0	0,33	02.03.02	0,9	0,0	-0,3	87,4	1,65
20.12.01	1,0	0,1	-4,3	113,1	0,80	03.03.02	0,8	0,0	1,3	106,0	1,98
21.12.01	4,7	0,0	-1,5	123,5	0,17	04.03.02	0,7	0,0	1,4	114,1	1,90
22.12.01	1,8	0,4	-1,6	129,0	0,23	05.03.02	0,6	0,0	2,0	116,2	2,26
23.12.01	0,5	0,1	-10,3	107,6	0,93	06.03.02	2,5	1,5	4,3	130,5	1,24
24.12.01	3,1	0,0	-4,7	122,0	0,28	07.03.02	3,2	0,5	5,7	117,5	1,22
25.12.01	4,1	9,8	0,5	134,8	0,20	08.03.02	0,8	0,0	3,0	112,9	3,26
26.12.01	0,2	0,0	-1,3	117,7	0,53	09.03.02	2,2	0,1	5,8	112,9	1,59
27.12.01	0,9	0,0	-1,5	128,3	0,26	10.03.02	2,1	0,0	3,3	97,7	3,22
28.12.01	4,1	4,9	2,7	124,6	0,27	11.03.02	1,1	0,0	4,1	106,8	3,33
29.12.01	0,5	0,0	-0,7	129,7	0,10	12.03.02	0,6	0,0	7,9	102,4	2,38
30.12.01	1,7	0,0	-2,3	118,1	0,08	13.03.02	0,9	0,0	7,2	111,1	2,97
31.12.01	0,2	0,1	-8,8	113,3	0,14	14.03.02	1,9	7,7	1,2	125,8	0,64
01.01.02	0,7	0,0	-6,0	127,2	0,08	15.03.02	1,1	1,1	5,1	127,5	1,48
02.01.02	0,3	0,0	-7,8	114,0	0,17	16.03.02	0,7	0,0	7,9	116,5	2,88
03.01.02	1,2	0,0	-6,2	103,6	0,19	17.03.02	1,1	0,0	8,0	112,2	2,97
04.01.02	0,7	0,0	-10,6	90,2	0,21	18.03.02	2,7	10,6	8,2	119,6	1,56
05.01.02	0,4	0,0	-12,3	103,2	0,22	19.03.02	2,8	5,1	6,2	108,5	1,07
06.01.02	0,2	0,0	-3,8	119,8	0,36	20.03.02	2,7	12,9	9,4	125,8	1,21
07.01.02	1,0	4,5	0,6	128,3	0,64	21.03.02	3,1	6,8	9,6	120,1	1,47

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
22.03.02	1,6	2,1	6,4	117,3	1,17	03.06.02	0,8	1,2	16,5	95,4	4,53
23.03.02	0,7	0,0	3,5	98,1	2,05	04.06.02	0,8	9,5	16,9	114,4	4,59
24.03.02	0,8	0,0	2,1	98,2	3,07	05.06.02	0,9	5,1	15,5	119,6	2,41
25.03.02	0,8	0,0	0,6	95,5	4,11	06.06.02	0,9	6,7	15,3	105,7	4,05
26.03.02	0,8	0,0	0,3	100,7	4,52	07.06.02	1,6	5,5	13,1	114,4	2,69
27.03.02	1,1	0,0	1,2	94,4	4,55	08.06.02	0,9	0,0	14,1	104,8	4,15
28.03.02	1,2	0,0	3,6	78,6	4,93	09.06.02	0,8	0,0	14,9	102,0	4,07
29.03.02	1,1	0,0	4,7	81,9	4,16	10.06.02	2,3	3,4	11,2	109,4	3,84
30.03.02	0,4	0,0	5,6	108,8	1,88	11.06.02	2,2	2,2	12,1	126,7	3,40
31.03.02	1,1	0,0	5,9	102,2	4,15	12.06.02	2,3	0,6	14,7	117,4	1,82
01.04.02	0,8	0,0	7,4	96,9	4,46	13.06.02	2,7	0,0	15,4	111,6	2,37
02.04.02	0,9	0,0	9,7	86,2	4,63	14.06.02	1,3	0,0	18,5	104,7	5,02
03.04.02	1,5	0,0	12,3	70,4	4,88	15.06.02	1,3	0,2	18,7	113,6	3,00
04.04.02	1,5	0,0	9,2	71,1	4,57	16.06.02	1,1	0,0	17,6	111,8	5,57
05.04.02	1,7	0,0	6,5	68,7	4,90	17.06.02	0,7	0,0	22,2	109,2	6,87
06.04.02	2,0	0,0	3,7	70,7	4,56	18.06.02	1,0	0,0	23,8	98,5	6,92
07.04.02	1,4	0,0	3,4	75,5	5,39	19.06.02	0,8	0,0	19,6	101,4	5,45
08.04.02	1,4	0,0	4,5	68,7	5,37	20.06.02	1,4	0,0	18,3	111,1	3,41
09.04.02	1,0	0,0	5,0	69,2	3,33	21.06.02	0,9	0,0	17,3	108,7	4,46
10.04.02	2,2	0,0	5,4	71,7	3,88	22.06.02	1,5	0,0	19,3	100,1	5,73
11.04.02	1,2	0,0	5,1	89,6	4,74	23.06.02	0,8	0,0	17,6	99,3	5,52
12.04.02	1,0	0,0	8,4	89,8	4,94	24.06.02	1,0	0,0	15,7	83,3	7,40
13.04.02	0,7	0,1	5,5	109,8	2,04	25.06.02	0,8	0,0	15,7	84,1	7,25
14.04.02	0,9	0,1	4,3	101,4	2,53	26.06.02	1,1	0,0	18,3	88,4	6,65
15.04.02	1,0	1,0	5,4	104,7	2,77	27.06.02	1,4	0,0	14,7	96,8	4,53
16.04.02	1,1	7,8	4,5	132,0	1,00	28.06.02	1,5	0,0	12,6	87,4	6,66
17.04.02	0,7	2,5	6,3	126,9	1,44	29.06.02	1,4	0,0	11,8	94,4	3,15
18.04.02	1,2	1,0	7,4	117,4	3,16	30.06.02	1,7	0,0	15,0	93,7	6,64
19.04.02	0,6	12,5	4,3	128,8	1,35	01.07.02	2,5	1,0	13,1	103,6	2,44
20.04.02	0,7	0,4	7,0	114,8	3,42	02.07.02	2,5	1,7	13,1	112,9	2,48
21.04.02	0,9	0,0	8,2	104,1	5,34	03.07.02	2,5	13,4	12,8	125,3	0,81
22.04.02	0,7	0,0	10,0	102,3	4,05	04.07.02	2,0	0,2	13,3	107,6	2,19
23.04.02	0,6	0,0	12,9	98,5	3,32	05.07.02	1,3	1,1	14,9	103,1	5,29
24.04.02	0,6	0,0	11,9	105,0	3,08	06.07.02	1,3	6,1	14,5	125,0	3,99
25.04.02	0,9	0,0	11,8	103,3	5,52	07.07.02	1,3	0,1	15,0	112,3	3,85
26.04.02	2,7	2,9	8,5	122,3	2,01	08.07.02	1,1	0,0	18,4	100,3	7,47
27.04.02	2,9	5,4	6,2	109,8	3,37	09.07.02	0,9	7,9	19,2	117,1	5,47
28.04.02	3,2	3,5	7,8	126,5	1,14	10.07.02	0,8	16,2	13,0	130,7	1,70
29.04.02	4,3	3,4	7,1	104,8	3,25	11.07.02	1,5	0,0	13,5	104,5	6,69
30.04.02	2,8	0,1	8,6	94,7	5,69	12.07.02	0,5	0,0	16,5	99,3	5,55
01.05.02	2,6	3,8	9,2	105,2	2,77	13.07.02	0,5	1,9	15,8	115,7	3,78
02.05.02	1,3	0,0	7,4	119,3	1,73	14.07.02	0,8	0,0	16,3	124,5	1,04
03.05.02	0,8	0,0	7,2	106,2	1,69	15.07.02	0,7	0,2	18,6	116,2	3,18
04.05.02	0,7	14,5	6,5	127,6	0,84	16.07.02	1,0	0,3	17,3	106,2	3,78
05.05.02	1,2	5,0	4,5	128,0	1,17	17.07.02	1,0	0,5	16,1	108,0	1,53
06.05.02	0,5	0,4	7,2	115,4	2,17	18.07.02	1,0	0,0	13,5	95,0	3,41
07.05.02	1,2	0,1	11,6	102,4	6,09	19.07.02	0,8	0,0	13,8	100,4	6,56
08.05.02	1,2	0,0	14,3	110,0	4,57	20.07.02	1,1	0,0	16,7	96,3	6,37
09.05.02	1,0	0,1	17,6	102,3	5,73	21.07.02	1,8	0,1	15,4	94,9	5,73
10.05.02	1,4	1,1	14,2	121,2	2,99	22.07.02	1,1	0,0	13,3	105,8	3,25
11.05.02	1,1	0,0	14,1	116,0	3,82	23.07.02	1,6	0,0	17,0	99,1	4,52
12.05.02	1,1	1,4	11,8	118,0	2,65	24.07.02	1,6	0,0	15,6	100,1	3,05
13.05.02	0,8	0,0	13,9	110,2	4,49	25.07.02	1,0	0,1	14,6	100,6	3,62
14.05.02	3,2	6,3	10,6	113,2	2,90	26.07.02	0,9	0,6	16,7	116,9	1,90
15.05.02	1,3	0,1	11,9	112,8	5,88	27.07.02	0,6	0,0	18,7	107,9	4,63
16.05.02	0,7	0,0	14,8	100,2	6,68	28.07.02	0,9	0,0	19,5	94,4	6,70
17.05.02	0,7	0,0	17,3	100,8	6,58	29.07.02	0,7	0,0	21,4	94,3	6,44
18.05.02	1,4	2,1	13,2	118,6	2,63	30.07.02	0,8	36,3	20,8	105,5	4,49
19.05.02	1,0	0,1	13,1	109,5	4,66	31.07.02	1,0	0,1	18,8	121,0	3,72
20.05.02	0,8	0,0	13,3	103,0	5,64	01.08.02	1,0	15,8	16,0	118,6	2,81
21.05.02	1,1	0,0	17,7	89,2	6,72	02.08.02	1,2	0,0	16,5	103,5	5,60
22.05.02	1,6	0,1	15,5	93,9	3,27	03.08.02	0,9	5,7	14,5	121,6	2,33
23.05.02	0,9	3,9	11,6	127,4	1,65	04.08.02	1,1	0,1	15,2	112,0	4,94
24.05.02	2,3	1,2	11,7	112,8	4,40	05.08.02	1,6	2,7	14,6	115,0	4,23
25.05.02	2,0	1,6	9,8	112,3	4,11	06.08.02	0,9	1,4	14,3	118,1	3,55
26.05.02	1,4	3,8	10,0	111,8	3,98	07.08.02	0,6	8,9	14,7	126,3	2,42
27.05.02	1,4	0,1	10,9	106,7	5,42	08.08.02	0,6	1,6	15,1	123,5	3,97
28.05.02	1,5	0,0	11,9	101,8	6,15	09.08.02	0,7	20,5	15,3	127,4	3,47
29.05.02	2,1	0,1	11,8	97,8	3,66	10.08.02	0,7	4,3	15,9	121,2	4,29
30.05.02	0,9	0,0	11,5	101,3	4,70	11.08.02	0,8	0,0	16,5	113,9	2,08
31.05.02	1,1	0,0	13,4	93,3	6,34	12.08.02	1,3	0,4	16,3	104,2	3,42
01.06.02	0,9	0,0	13,3	84,3	7,68	13.08.02	1,0	0,0	16,1	105,9	4,61
02.06.02	1,1	0,0	15,5	75,9	6,51	14.08.02	0,7	0,0	17,3	111,6	5,93

ANHANG

Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung	Datum	Wind	Nieder-schlag	T_{Luft}	rel. Luft-feuchte	Global-strahlung
	[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]		[m/s]	[mm/d]	[°C]	[%]	[kWh/m2/d]
15.08.02	0,7	0,0	17,3	107,4	5,01	27.10.02	5,6	12,5	8,3	109,4	0,85
16.08.02	0,7	0,0	18,8	107,2	4,84	28.10.02	2,5	0,0	5,2	98,0	1,98
17.08.02	0,8	0,0	18,8	105,7	5,96	29.10.02	1,1	0,0	7,1	109,9	1,16
18.08.02	0,7	0,0	20,4	102,5	5,11	30.10.02	1,2	4,2	9,4	133,1	0,39
19.08.02	0,8	14,2	20,2	109,9	4,68	31.10.02	0,3	0,3	10,1	134,7	0,47
20.08.02	0,9	7,6	18,2	127,6	2,12	01.11.02	1,7	1,0	10,4	133,1	0,34
21.08.02	1,6	5,4	15,1	136,2	0,71	02.11.02	1,3	10,5	11,4	130,4	1,32
22.08.02	0,5	0,5	15,1	127,9	1,17	03.11.02	1,6	15,2	9,7	123,2	1,04
23.08.02	0,6	0,0	17,5	116,4	3,57	04.11.02	1,3	0,1	7,2	120,6	0,77
24.08.02	0,8	3,5	16,4	122,7	2,37	05.11.02	0,3	0,3	6,9	125,1	0,79
25.08.02	0,6	0,0	14,9	116,4	2,58	06.11.02	1,1	0,0	4,8	125,5	0,44
26.08.02	0,8	0,0	19,0	113,4	4,51	07.11.02	1,2	3,7	4,3	118,9	0,42
27.08.02	0,9	0,0	18,1	121,8	2,33	08.11.02	3,1	2,4	4,3	121,5	0,35
28.08.02	0,5	0,0	18,7	122,7	2,05	09.11.02	1,8	6,8	5,7	117,4	0,75
29.08.02	0,6	0,0	18,0	121,6	3,23	10.11.02	1,0	3,5	4,2	132,8	0,60
30.08.02	0,5	0,0	17,3	118,4	3,64	11.11.02	2,2	4,6	8,7	117,5	0,83
31.08.02	0,8	0,0	16,6	110,4	2,85	12.11.02	2,3	12,0	8,1	120,6	0,45
01.09.02	0,8	0,0	13,1	98,6	2,85	13.11.02	2,0	0,8	5,7	117,4	0,39
02.09.02	1,2	0,0	15,0	94,4	3,89	14.11.02	1,4	1,6	7,4	119,1	0,38
03.09.02	1,0	0,0	13,4	91,6	3,99	15.11.02	0,4	1,5	6,7	135,2	0,45
04.09.02	1,1	4,4	14,0	127,4	1,75	16.11.02	0,5	12,0	8,2	135,9	0,26
05.09.02	1,0	0,0	14,4	120,7	3,47	17.11.02	1,7	0,7	5,4	131,0	0,39
06.09.02	1,2	0,0	14,0	111,9	4,33	18.11.02	0,6	0,0	6,0	134,2	0,32
07.09.02	1,1	0,0	14,4	114,2	4,10	19.11.02	0,5	0,0	5,5	122,4	0,26
08.09.02	0,9	2,4	15,9	113,3	3,56	20.11.02	0,6	0,0	4,3	123,8	1,00
09.09.02	1,0	0,2	16,5	113,6	2,80	21.11.02	0,9	0,2	7,0	120,8	0,56
10.09.02	0,6	15,1	13,3	124,6	2,14	22.11.02	1,3	1,0	6,4	129,4	0,32
11.09.02	0,6	0,1	13,5	124,1	1,52	23.11.02	0,7	3,6	6,0	120,5	0,63
12.09.02	1,3	0,0	15,4	101,1	4,66	24.11.02	0,6	0,0	6,1	131,3	0,37
13.09.02	0,8	0,0	12,6	92,0	4,08	25.11.02	1,0	6,0	6,9	125,8	0,27
14.09.02	0,8	0,0	13,9	109,9	3,72	26.11.02	0,9	0,2	6,1	129,7	0,52
15.09.02	0,7	0,0	11,3	105,0	4,20	27.11.02	0,6	0,0	6,1	125,4	0,43
16.09.02	0,6	0,0	10,9	113,7	3,28	28.11.02	1,2	0,6	6,2	131,0	0,31
17.09.02	0,6	0,0	10,1	118,9	2,30	29.11.02	1,0	2,4	6,6	133,3	0,31
18.09.02	0,7	0,0	11,0	109,0	3,45	30.11.02	0,8	0,0	5,2	131,4	0,33
19.09.02	0,6	0,0	13,3	109,1	2,90	01.12.02	1,4	5,8	4,9	121,3	0,50
20.09.02	0,5	0,0	12,2	104,8	1,89	02.12.02	2,2	2,2	4,5	131,1	0,13
21.09.02	0,4	0,0	10,7	109,9	1,67	03.12.02	0,4	0,0	4,8	128,0	0,42
22.09.02	0,9	8,0	9,2	127,2	2,08	04.12.02	0,4	0,0	4,1	126,5	0,27
23.09.02	0,9	0,4	8,3	113,1	1,17	05.12.02	0,8	0,7	4,1	122,8	0,23
24.09.02	1,2	0,0	8,4	87,5	4,32	06.12.02	1,7	0,0	-0,1	119,5	0,11
25.09.02	0,8	0,7	8,0	120,9	1,30	07.12.02	1,7	0,0	-1,6	125,9	0,17
26.09.02	0,8	5,8	9,3	130,8	0,93	08.12.02	1,7	0,0	-2,8	108,6	0,57
27.09.02	0,6	0,2	9,5	121,3	1,85	09.12.02	1,9	0,0	-7,1	93,7	0,98
28.09.02	0,6	0,0	8,1	109,0	3,23	10.12.02	1,8	0,0	-6,2	95,8	1,01
29.09.02	0,8	0,0	8,7	114,8	3,20	11.12.02	1,7	0,0	-6,9	100,0	1,10
30.09.02	0,8	0,0	8,3	109,0	2,89	12.12.02	1,0	0,0	-3,8	106,9	0,57
01.10.02	0,7	0,0	9,7	118,2	3,02	13.12.02	0,8	0,0	-0,1	130,9	0,26
02.10.02	0,5	0,0	10,9	122,4	2,08	14.12.02	0,9	0,0	0,3	127,8	0,33
03.10.02	0,6	0,6	12,9	125,7	1,50	15.12.02	0,9	6,3	0,9	133,2	0,10
04.10.02	0,7	2,5	11,8	112,7	2,75	16.12.02	3,0	2,2	3,9	136,2	0,12
05.10.02	1,4	7,0	10,1	126,2	1,21	17.12.02	0,8	0,0	0,7	125,9	0,18
06.10.02	1,1	1,1	8,3	124,7	0,81	18.12.02	0,9	0,0	-1,9	116,9	0,59
07.10.02	0,7	0,0	5,5	119,1	1,93	19.12.02	1,0	0,0	-1,3	114,5	0,86
08.10.02	0,8	0,0	6,1	113,5	1,92	20.12.02	1,3	0,4	0,0	130,5	0,23
09.10.02	1,4	0,0	7,7	97,5	2,76	21.12.02	0,5	3,2	4,0	129,3	0,17
10.10.02	1,5	0,0	6,8	103,5	2,57	22.12.02	2,2	15,0	7,8	130,6	0,09
11.10.02	1,1	0,0	5,8	109,5	0,73	23.12.02	0,8	0,1	6,6	135,8	0,20
12.10.02	0,6	1,3	5,8	123,2	0,57	24.12.02	1,6	0,6	8,3	138,0	0,25
13.10.02	0,6	0,8	8,0	129,8	0,80	25.12.02	0,8	1,1	7,6	139,4	0,29
14.10.02	2,8	0,0	9,7	107,4	0,99	26.12.02	1,8	11,4	7,8	139,4	0,10
15.10.02	1,3	5,1	10,5	125,2	0,73	27.12.02	1,2	2,4	8,8	138,7	0,27
16.10.02	1,9	5,3	11,1	128,1	0,50	28.12.02	1,8	1,8	6,9	131,3	0,25
17.10.02	1,4	7,7	8,1	121,7	1,04	29.12.02	3,0	14,1	7,2	132,6	0,14
18.10.02	2,3	3,0	6,4	117,2	0,62	30.12.02	4,2	6,1	9,0	132,0	0,14
19.10.02	1,4	1,6	4,3	113,1	1,60	31.12.02	1,1	5,1	-0,2	131,0	0,16
20.10.02	0,7	0,0	3,9	112,7	1,41						
21.10.02	1,3	3,1	10,4	131,1	0,21						
22.10.02	2,6	11,0	11,7	132,6	0,63						
23.10.02	3,1	6,9	7,5	118,6	0,76						
24.10.02	2,0	0,5	6,6	115,4	1,13						
25.10.02	3,1	21,0	10,2	130,9	0,23						
26.10.02	4,3	15,5	8,8	105,4	1,49						

ANHANG

LIMNOLOGISCH-HYDROCHEMISCHE GRÖSSEN

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
20.04.99	0	7,7	12,6		1,95	3,2	26,9	Atmosphäre	2044,0
	2	7,6	12,2			2,5	19,9	0,0	1942,7
	4	7,1	12,2			3,0	23,9	0,5	1466,5
	6	6,5	12,8			1,8	24,5	1,0	715,4
	8	5,2	10,2			3,2	24,2	1,5	642,4
	10	4,7	9,3			3,5	18,7	2,0	469,2
	12	4,5	7,5			2,1	23,9	2,5	306,3
	14	4,3	5,9			1,9	22,5	3,0	204,6
	16	4,3	4,4			2,3	20,8	3,5	159,5
	18	4,2	1,8			1,6	20,1	4,0	114,8
	19	4,2	1,2					4,5	69,0
								5,0	50,7
	Quelle	10,5	9,4			4,3	26,7	5,5	31,1
	Zulauf	9,2	10,7			1,1	27,9	6,0	16,1
	Ablauf	9,5	12,2			3,1	24,7	6,5	6,8
								7,0	3,2
04.05.99	0	15,9	11,6	8,69	1,40	2,3	24,1	Atmosphäre	1497,2
	2	12,7	14,1	8,66		2,5	24,4	0,0	818,2
	4	8,6	13,6	8,71		1,1	25,2	0,5	556,1
	6	6,6	19,2	9,83		3,2	25,1	1,0	367,3
	8	4,8	9,7	7,85		2,3	26,4	1,5	237,4
	10	4,3	8,6	7,57		3,0	26,3	2,0	185,5
	12	4,2	7,5	7,46		3,9	24,9	2,5	141,2
	14	4,2	6,2	7,38		1,4	23,8	3,0	101,0
	16	4,1	3,3	7,28		3,2	21,4	3,5	75,7
	18	4,1	0,8	7,20		4,2	19,3	4,0	66,5
	19	4,2	0,3	7,62				4,5	53,1
								5,0	38,8
	Quelle	11,3	9,4	7,56		6,1	30,7	5,5	25,5
	Zulauf	12,9	9,4	7,63		3,3	23,9	6,0	12,6
	Ablauf	16,4	11,8	8,79		2,7	23,6	6,5	3,7
								7,0	0,7
18.05.99	0	15,1	11,3	8,98	2,00	2,3	22,5	Atmosphäre	2298,0
	2	14,8	11,6	8,78		2,5	22,6	0,0	1663,9
	4	9,7	14,7	9,03		3,5	24,5	0,5	1212,6
	6	7,7	21,3	10,12		3,4	23,8	1,0	918,0
	8	4,9	8,9	8,60		3,7	26,2	1,5	541,8
	10	4,4	7,9	7,72		2,0	25,9	2,0	407,5
	12	4,3	6,5	7,59		2,6	26,2	2,5	310,7
	14	4,2	5,2	7,47		3,6	20,9	3,0	231,7
	16	4,2	2,2	7,42		4,1	18,4	3,5	179,5
	18	4,2	0,2	7,34		4,5	16,9	4,0	138,2
	19	4,3	0,1	7,81				4,5	112,9
								5,0	69,6
	Quelle	12,0	9,7	7,30		3,1	32,5	5,5	32,9
	Zulauf	13,7	9,3	7,66		4,2	24,5	6,0	9,0
	Ablauf	16,1	11,5	9,02		1,5	22,4	6,5	1,7
								7,0	0,5
01.06.99	0	21,0	9,2	8,81	2,20	1,7	13,9	Atmosphäre	1574,2
	2	19,4	10,6	8,62		2,0	22,0	0,0	1195,4
	4	11,5	16,5	9,45		2,9	23,6	0,5	648,6
	6	7,2	20,7	10,19		2,8	22,7	1,0	443,3
	8	5,1	7,5	8,06		1,5	25,9	1,5	464,0
	10	4,4	6,9	7,82		3,6	25,3	2,0	149,6
	12	4,3	5,6	7,67		2,4	23,6	2,5	182,1
	14	4,2	3,9	7,60		2,9	23,8	3,0	202,2
	16	4,2	1,2	7,51		3,2	25,2	3,5	112,5
	18	4,2	0,2	7,47		3,5	24,3	4,0	102,5
	19	4,3	0,1	7,31				4,5	59,9
								5,0	17,1
	Quelle	14,0	8,2	7,41		6,9	32,2	5,5	6,7
	Zulauf	15,5	8,0	7,59		3,5	24,7	6,0	2,1
	Ablauf	22,1	9,3	8,83		1,0	12,8	6,5	0,8
								7,0	0,4
15.06.99	0	20,1	9,4	8,68	3,10	1,1	20,1	Atmosphäre	2632,9
	2	19,3	9,9	8,68		1,7	20,1	0,0	2004,0
	4	14,2	20,2	9,15		3,2	23,4	0,5	1523,7
	6	7,4	18,4	9,18		3,4	23,2	1,0	1191,6
	8	5,1	6,5	8,07		3,9	25,5	1,5	884,4
	10	4,5	5,7	7,84		4,3	21,3	2,0	693,4
	12	4,3	5,5	7,70		4,3	21,8	2,5	540,5
	14	4,2	3,0	7,60		4,8	22,5	3,0	390,4
	16	4,2	0,3	7,55		5,1	17,6	3,5	308,7
	18	4,3	0,2	7,48		6,3	8,9	4,0	158,1
	19	4,3	0,2	7,40				4,5	108,5
	Quelle	14,7	8,9	7,59		7,5	34,6	5,0	49,1
	Zulauf	15,7	7,9	7,69		5,5	29,5	5,5	19,9
	Ablauf	21,8	9,8	8,92		1,1	19,4	6,0	5,1
								6,5	2,1
								7,0	1,1

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
29.06.99	0	19,3	10,3	8,84	1,10	0,3	18,5	Atmosphäre	1041,7
	2	19,2	10,4	8,70		0,3	18,5	0,0	559,5
	4	15,9	18,4	9,18		3,0	22,4	0,5	368,6
	6	7,5	18,5	9,15		4,1	23,7	1,0	227,2
	8	5,1	6,3	7,91		4,1	25,8	1,5	154,8
	10	4,5	5,6	7,76		3,7	24,6	2,0	112,8
	12	4,4	4,4	7,69		4,9	23,7	2,5	78,4
	14	4,3	2,1	7,61		5,0	21,0	3,0	56,2
	16	4,3	0,2	7,51		5,3	17,2	3,5	40,1
	18	4,4	0,2	7,44		6,7	7,3	4,0	26,6
	19	4,5	0,2	7,31				4,5	16,3
	Quelle	12,1	9,1	7,75		8,2	35,4	5,0	8,2
	Zulauf	13,8	8,1	9,00		5,9	23,3	5,5	3,8
	Ablauf	19,4	10,5	7,95		0,4	18,3	6,0	1,8
								6,5	0,7
								7,0	0,3
13.07.99	0	23,7	10,1	9,52	0,90	0,2	16,5	Atmosphäre	1005,5
	2	22,6	10,4	9,39		< 0,15	17,0	0,0	707,2
	4	16,6	20,6	10,03		1,9	20,7	0,5	360,9
	6	8,2	17,0	9,19		3,6	22,6	1,0	235,4
	8	5,2	5,6	8,15		4,2	25,6	1,5	156,5
	10	4,5	4,6	7,83		4,1	25,3	2,0	97,9
	12	4,5	3,2	7,75		4,3	23,4	2,5	59,3
	14	4,3	0,8	7,66		4,5	17,0	3,0	38,1
	16	4,3	0,2	7,59		4,6	16,2	3,5	25,7
	18	4,4	0,2	7,54		6,0	5,3	4,0	12,5
	19	4,5	0,2	7,37				4,5	4,8
	Quelle	15,9	8,5	7,67		7,3	35,9	5,0	2,2
	Zulauf	16,2	6,6	7,66		5,4	29,1	5,5	1,1
	Ablauf	24,4	9,9	9,47		0,2	15,9	6,0	0,5
								6,5	0,3
								7,0	0,2
27.07.99	0	21,8	12,1	9,78	0,70	1,0	14,9	Atmosphäre	2050,0
	2	20,3	13,3	9,75		0,3	15,1	0,0	1421,0
	4	16,8	20,1	9,72		2,1	20,0	0,5	859,0
	6	8,8	13,2	9,20		3,8	22,9	1,0	458,0
	8	5,5	4,4	8,14		3,9	25,0	1,5	213,0
	10	4,7	4,5	7,94		4,1	24,5	2,0	96,8
	12	4,5	2,1	7,84		4,2	23,0	2,5	46,1
	14	4,4	0,4	7,80		5,1	14,5	3,0	20,7
	16	4,4	0,2	7,72		4,7	12,9	3,5	10,8
	18	4,5	0,2	7,61		5,3	0,7	4,0	5,8
	19	4,5	0,2	7,28				4,5	3,2
	Quelle	14,9	8,9	7,97		7,0	26,7	5,0	1,7
	Zulauf	15,3	6,7	7,95		6,3	22,6	5,5	1,0
	Ablauf	22,0	11,9	9,93		0,5	14,7	6,0	0,6
								6,5	0,3
								7,0	0,2
10.08.99	0	21,9	13,0	10,35	0,95	1,0	13,8	Atmosphäre	559,6
	2	21,9	12,8	10,22		0,8	12,9	0,0	391,0
	4	16,8	21,8	10,25		2,3	18,8	0,5	215,8
	6	9,0	12,1	8,71		3,7	22,6	1,0	107,6
	8	5,5	4,0	7,93		0,9	16,1	1,5	61,9
	10	4,8	3,4	7,78		3,2	22,2	2,0	33,7
	12	4,5	1,5	7,64		4,2	24,0	2,5	19,4
	14	4,5	0,3	7,60		4,6	22,0	3,0	9,9
	16	4,5	0,2	7,58		4,5	12,8	3,5	4,8
	18	4,5	0,2	7,57		4,8	0,3	4,0	2,7
	19	4,6	0,2	7,23				4,5	1,9
	Quelle	14,2	9,0	7,78		7,1	42,0	5,0	1,1
	Zulauf	15,3	6,0	8,00		6,2	19,2	5,5	0,5
	Ablauf	21,6	11,9	10,40		0,8	13,8	6,0	0,3
								6,5	0,1
								7,0	0,0
24.08.99	0	18,5	11,8	9,85	1,50	1,9	14,5	Atmosphäre	2242,0
	2	18,1	12,4	9,72		1,5	16,2	0,0	838,6
	4	17,0	13,6	9,78		1,6	16,0	0,5	608,2
	6	9,1	9,9	7,95		3,6	28,7	1,0	455,8
	8	5,6	2,6	7,55		3,9	27,0	1,5	292,2
	10	4,7	2,0	7,47		4,1	25,6	2,0	193,6
	12	4,5	0,2	7,35		4,5	23,1	2,5	132,0
	14	4,5	0,2	7,32		4,5	18,9	3,0	80,1
	16	4,5	0,2	7,33		5,1	13,5	3,5	56,3
	18	4,6	0,2	7,21		6,0	0,7	4,0	28,4
	19	4,6	0,2	7,35				4,5	15,8
	Quelle	14,3	9,1	7,03		7,5	39,2	5,0	10,1
	Zulauf	13,6	5,0	7,77		6,9	17,9	5,5	5,8
	Ablauf	20,7	12,9	9,52		1,2	14,2	6,0	3,2
								6,5	2,5
								7,0	1,2

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
07.09.99	0	19,4	11,8	8,37	1,00	2,5	13,4	Atmosphäre	422,5
	2	19,4	11,2	9,85		1,5	13,3	0,0	269,9
	4	16,3	15,2	9,86		1,9	17,0	0,5	172,0
	6	9,3	8,3	7,94		3,7	25,2	1,0	107,3
	8	5,7	1,8	7,49		4,0	24,9	1,5	78,8
	10	4,8	1,3	7,39		4,3	31,9	2,0	45,4
	12	4,7	0,1	7,37		4,5	21,1	2,5	36,2
	14	4,6	0,1	7,39		4,8	16,3	3,0	25,0
	16	4,6	0,1	7,39		5,2	8,3	3,5	17,4
	18	4,6	0,1	7,18		6,3	< 0,1	4,0	12,5
	19	4,6	0,1	7,18				4,5	8,6
	Quelle	14,2	9,0	7,46		7,2	40,0	5,0	5,6
	Zulauf	14,5	4,0	7,55		7,5	7,3	5,5	3,3
	Ablauf	19,3	8,4	9,99		1,4	13,7	6,0	1,7
								6,5	0,9
								7,0	0,5
21.09.99	0	18,1	10,2	9,80	1,10	1,3	12,6	Atmosphäre	1289,9
	2	18,1	9,2	9,77		1,5	10,4	0,0	669,5
	4	17,2	8,9	9,75		1,8	13,7	0,5	394,8
	6	9,9	6,3	8,11		3,8	23,3	1,0	277,6
	8	5,8	1,2	7,68		4,3	24,9	1,5	209,2
	10	5,0	0,3	7,52		4,4	22,7	2,0	134,8
	12	4,8	0,3	7,47		4,6	20,3	2,5	94,2
	14	4,7	0,3	7,48		4,7	16,2	3,0	68,8
	16	4,6	0,3	7,46		5,4	4,9	3,5	50,5
	18	4,7	0,3	7,26		6,4	< 0,1	4,0	33,6
	19	4,7	0,3	7,28				4,5	19,3
	Quelle	14,1	9,4	7,86		7,4	41,0	5,0	11,2
	Zulauf							5,5	5,1
	Ablauf	17,5	8,1	9,98		1,4	11,9	6,0	2,1
								6,5	0,9
								7,0	0,5
05.10.99	0	13,6	7,7	8,97	1,40	2,0	14,0	Atmosphäre	554,1
	2	13,7	7,2	9,52		1,9	14,0	0,0	308,7
	4	13,6	6,8	9,41		2,0	14,0	0,5	172,1
	6	13,2	6,3	9,44		2,2	15,2	1,0	110,5
	8	6,4	0,2	7,72		4,2	22,8	1,5	71,8
	10	5,2	0,2	7,58		4,1	21,3	2,0	45,9
	12	4,9	0,2	7,52		4,6	20,0	2,5	36,1
	14	4,8	0,2	7,52		4,9	15,0	3,0	23,5
	16	4,7	0,2	7,49		5,3	6,1	3,5	13,8
	18	4,8	0,2	7,27		6,4	< 0,1	4,0	9,5
	19	4,8	0,2	7,29				4,5	5,9
	Quelle	12,9	9,5	7,70		7,3	40,9	5,0	3,8
	Zulauf	10,9	9,0	7,99		5,2	31,4	5,5	2,5
	Ablauf	13,1	8,7	9,75		1,8	14,1	6,0	1,5
						0,1	0,8	6,5	0,7
								7,0	0,3
19.10.99	0	10,2	8,1	8,92	1,70	2,3	14,9	Atmosphäre	1811,7
	2	10,2	8,0	9,32		1,2	14,9	0,0	740,4
	4	10,2	7,8	9,18		2,3	15,1	0,5	526,3
	6	10,1	7,4	9,25		2,3	15,1	1,0	323,7
	8	7,7	3,3	7,89		2,9	20,2	1,5	178,1
	10	5,2	0,2	7,54		4,1	20,6	2,0	115,1
	12	5,0	0,2	7,51		4,7	16,9	2,5	74,3
	14	4,9	0,2	7,49		4,3	14,6	3,0	47,3
	16	4,8	0,2	7,45		5,6	3,7	3,5	31,8
	18	4,8	0,2	7,24		6,6	< 0,1	4,0	19,6
	19	4,8	0,2	7,36				4,5	12,9
	Quelle	11,8	11,3	7,46		7,5	41,3	5,0	8,5
	Zulauf	5,9	9,9	8,00		5,4	32,6	5,5	5,6
	Ablauf	9,2	9,1	9,57		2,1	15,4	6,0	3,8
								6,5	2,7
								7,0	1,8
02.11.99	0	9,6	11,2	9,25	2,00	1,9	15,1	Atmosphäre	148,5
	2	9,4	10,6	9,20		1,8	15,1	0,0	93,3
	4	9,2	10,0	9,10		1,2	15,0	0,5	67,2
	6	9,1	9,0	9,19		1,9	15,1	1,0	38,4
	8	8,0	5,0	8,15		2,3	16,0	1,5	31,4
	10	5,4	0,3	7,59		4,2	19,7	2,0	20,3
	12	5,1	0,2	7,52		4,7	15,7	2,5	14,7
	14	5,0	0,2	7,41		1,0	13,6	3,0	10,4
	16	4,9	0,2	7,47		5,1	9,9	3,5	7,3
	18	4,9	0,2	7,22		6,4	0,4	4,0	5,1
	19	4,9	0,2	7,23				4,5	3,5
	Quelle	11,7	10,3	8,08		8,1	38,9	5,0	2,4
	Zulauf	10,2	9,1	7,73		4,7	19,3	5,5	1,6
	Ablauf	9,9	8,9	9,23		1,9	14,5	6,0	1,0
								6,5	0,7
								7,0	0,4

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
16.11.99	0	6,3	8,0	8,45	1,70	2,5	16,3	Atmosphäre	1788,7
	2	6,3	7,8	8,28		2,9	16,5	0,0	729,5
	4	6,3	7,3	8,20		2,7	16,6	0,5	442,8
	6	6,3	7,0	8,30		1,3	16,5	1,0	240,3
	8	6,3	6,5	8,34		2,4	16,1	1,5	119,0
	10	6,2	6,6	8,36		3,0	16,6	2,0	67,9
	12	5,3	0,6	7,88		4,4	13,5	2,5	39,6
	14	5,1	0,3	7,75		4,8	11,6	3,0	24,2
	16	5,0	0,3	7,66		5,6	8,5	3,5	14,4
	18	5,0	0,3	7,44		5,5	< 0,1	4,0	9,0
	19	5,0	0,2	7,44				4,5	5,4
	Quelle	10,0	9,5	7,43		7,7	41,3	5,0	3,4
	Zulauf	4,0	10,4	7,85		1,2	49,4	5,5	2,1
	Ablauf	3,4	5,5	8,35		1,6	19,1	6,0	1,4
								6,5	0,9
								7,0	0,5
30.11.99	0	4,3	7,4	7,91	1,90	3,3	15,9	Atmosphäre	329,6
	2	4,3	7,3	7,76		3,1	16,4	0,0	215,7
	4	4,3	7,4	7,68		3,0	16,9	0,5	141,0
	6	4,3	7,5	7,69		2,9	15,8	1,0	87,2
	8	4,3	7,4	7,77		3,2	16,0	1,5	49,2
	10	4,3	7,3	7,84		1,7	16,1	2,0	32,9
	12	4,3	7,3	7,92		3,2	16,3	2,5	20,6
	14	4,4	6,7	7,93		2,3	16,4	3,0	13,2
	16	4,5	5,8	7,88		3,0	14,7	3,5	8,3
	18	4,7	2,1	7,69		4,1	9,9	4,0	5,8
	19	4,8	0,4	7,55				4,5	3,9
	Quelle	8,4	10,1	7,60		7,2	41,3	5,0	2,8
	Zulauf	5,5	10,8	7,79		3,9	50,0	5,5	1,8
	Ablauf	4,2	7,9	7,97		3,3	16,0	6,0	1,1
								6,5	0,7
								7,0	0,4
14.12.99	0	4,2	10,0	7,89	0,80	2,2	20,8	Atmosphäre	
	2	4,2	9,9	7,81		1,4	21,1	0,0	
	4	4,3	9,6	7,56		3,3	19,2	0,5	
	6	4,3	10,1	7,72		1,5	20,4	1,0	
	8	4,3	9,6	7,75		1,1	20,4	1,5	
	10	4,3	9,5	7,88		3,5	20,2	2,0	
	12	4,3	9,6	7,99		0,9	17,3	2,5	
	14	4,3	9,4	8,01		1,8	18,6	3,0	
	16	4,3	9,0	8,03		0,4	18,2	3,5	
	18	4,2	8,7	8,03		1,6	17,6	4,0	
	19	4,2	8,5	7,69				4,5	
	Quelle	9,3	9,4	7,12		1,0	25,5	5,0	
	Zulauf	4,2	10,6	8,21		1,5	56,5	5,5	
	Ablauf	5,4	11,4	7,92		2,5	24,0	6,0	
								6,5	
								7,0	
18.01.00	0				1,30	1,8	25,9	Atmosphäre	
	2					1,4	25,8	0,0	
	4					2,0	26,2	0,5	
	6					1,2	26,0	1,0	
	8					1,6	25,8	1,5	
	10							2,0	
	12							2,5	
	14							3,0	
	16							3,5	
	18							4,0	
	19							4,5	
	Quelle	7,7	10,7	7,48		2,6	37,2	5,0	
	Zulauf	4,6	11,7	8,26		2,2	31,8	5,5	
	Ablauf	3,3	11,6	7,60		2,2	26,9	6,0	
								6,5	
								7,0	
29.02.00	0	4,0	10,2	9,20	1,10	2,1	28,3	Atmosphäre	260,5
	2	4,0	11,0	9,10		1,8	28,5	0,0	165,7
	4	3,9	11,0	8,72		1,4	28,4	0,5	102,5
	6	3,9	10,2	8,46		1,5	28,5	1,0	49,5
	8	3,9	10,9	8,45		2,0	28,6	1,5	27,7
	10	3,9	11,2	8,46		2,5	28,6	2,0	16,5
	12	3,9	11,0	8,43		1,9	28,3	2,5	10,8
	14	3,9	10,8	8,46		2,3	28,0	3,0	7,4
	16	3,8	9,9	8,44		1,4	28,1	3,5	5,1
	18	3,7	8,2	8,45		2,4	26,9	4,0	3,6
	19	3,7	6,2	8,43				4,5	2,6
	Quelle	7,6	6,8	8,02		3,4	32,6	5,0	1,8
	Zulauf	4,8	10,6	7,89		1,7	35,2	5,5	1,3
	Ablauf	4,1	9,7	8,00		1,6	28,4	6,0	0,8
								6,5	0,6
								7,0	0,4

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
14.03.00	0	5,8	11,2	8,38		2,2	29,2	Atmosphäre	318,9
	2	5,5	10,6	8,07		2,0	29,2	0,0	217,9
	4	4,9	10,2	7,98		2,1	29,1	0,5	129,8
	6	4,8	10,1	7,93		2,3	29,1	1,0	76,4
	8	4,7	9,6	7,95		1,6	29,0	1,5	46,6
	10	4,5	9,4	7,98		2,2	29,0	2,0	30,4
	12	4,3	9,2	8,01				2,5	20,2
	14	4,3	8,9	8,05				3,0	14,9
	16	4,3	8,2	8,07				3,5	9,7
	18	4,3	7,9	8,06				4,0	5,9
	19	4,3	7,6	8,01				4,5	3,6
	Quelle	8,7	9,7	8,44		4,2	33,1	5,0	2,2
	Zulauf	7,2	10,8	8,27		1,6	29,6	5,5	1,5
	Ablauf	5,9	10,8	8,20		2,0	28,9	6,0	1,0
								6,5	0,5
								7,0	0,3
26.03.00	0	7,2	13,0	8,42	2,50	1,1	27,9	Atmosphäre	428,5
	2	7,2	11,8	8,08		0,6	34,0	0,0	237,1
	4	6,7	11,2	8,02		2,3	31,7	0,5	182,1
	6	5,2	10,4	7,90		1,3	29,8	1,0	134,7
	8	4,8	8,8	7,99		0,5	25,7	1,5	80,1
	10	4,5	8,1	7,99		1,4	28,0	2,0	60,4
	12	4,5	7,4	7,92		1,2	27,8	2,5	44,8
	14	4,5	7,1	7,87		1,2	29,7	3,0	29,6
	16	4,5	7,1	7,87		1,2	28,2	3,5	18,4
	18	4,4	6,4	7,84		1,5	25,9	4,0	11,4
	19	4,4	5,4	7,75				4,5	6,8
	Quelle	7,9	9,6	8,33		2,7	35,0	5,0	4,5
	Zulauf	5,4	9,5	8,41		0,3	31,2	5,5	2,7
	Ablauf	6,6	10,2	8,48		0,3	27,2	6,0	1,5
								6,5	0,6
								7,0	0,4
11.04.00	0	8,9	11,9	8,54	2,75	2,3	28,3	Atmosphäre	827,5
	2	8,9	11,1	8,23		1,9	28,8	0,0	561,2
	4	7,1	11,0	8,31		1,4	28,2	0,5	444,4
	6	5,8	11,0	8,61		0,8	28,0	1,0	542,6
	8	4,8	8,5	8,29		2,4	28,4	1,5	342,7
	10	4,6	7,6	8,18		1,2	26,5	2,0	286,6
	12	4,6	7,6	8,18		0,2	26,6	2,5	185,0
	14	4,6	6,7	7,99		2,6	26,3	3,0	145,0
	16	4,6	6,3	7,89		2,2	25,9	3,5	85,5
	18	4,6	5,6	7,80		2,2	25,4	4,0	63,7
	19	4,6	3,9	7,66				4,5	48,1
	Quelle	10,6	9,8	8,41		2,3	34,3	5,0	35,3
	Zulauf	7,8	10,8	7,99		2,4	30,2	5,5	20,2
	Ablauf	9,2	12,1	8,66		1,6	28,8	6,0	9,3
								6,5	3,8
								7,0	1,6
26.04.00	0	14,2	9,4	8,31	3,00	1,7	27,2	Atmosphäre	2133,0
	2	13,1	8,6	8,14		2,5	27,0	0,0	1541,7
	4	9,0	7,8	8,77		2,6	27,8	0,5	1094,2
	6	7,5	6,8	9,28		2,8	27,1	1,0	833,6
	8	5,3	5,6	8,42		2,3	23,1	1,5	662,3
	10	4,7	5,1	8,25		2,8	26,9	2,0	452,6
	12	4,6	4,7	8,72		2,0	26,2	2,5	332,8
	14	4,5	4,5	8,09		1,5	25,7	3,0	277,6
	16	4,6	4,2	8,03		2,7	23,2	3,5	213,7
	18	4,6	3,5	7,93		1,4	24,6	4,0	159,2
	19	4,6	2,2	7,72				4,5	121,8
	Quelle	12,5	9,0	7,96		4,9	34,9	5,0	97,3
	Zulauf	13,5	8,7	7,03		2,0	24,6	5,5	71,9
	Ablauf	14,5	10,0	8,56		2,2	26,8	6,0	52,1
								6,5	33,1
								7,0	14,1
09.05.00	0	19,1	6,5	7,96	4,00	2,4	25,5	Atmosphäre	2120,0
	2	17,5	6,1	7,65		1,6	25,8	0,0	1547,2
	4	10,9	7,3	8,61		2,1	27,5	0,5	1182,0
	6	7,9	7,9	10,02		0,4	24,5	1,0	895,7
	8	5,3	5,8	8,91		2,1	27,0	1,5	679,5
	10	4,7	4,9	8,49		0,7	26,5	2,0	481,7
	12	4,6	4,7	8,27		0,6	26,2	2,5	373,4
	14	4,6	4,2	8,19		2,5	25,5	3,0	300,2
	16	4,5	3,5	8,01		0,5	24,6	3,5	231,9
	18	4,5	1,2	7,85		2,4	22,2	4,0	179,1
	19	4,6	0,6	7,98				4,5	144,5
	Quelle	13,6	8,2	8,10		0,9	35,2	5,0	117,3
	Zulauf	13,9	7,7	8,05		2,4	24,0	5,5	75,1
	Ablauf	19,7	7,6	8,44		0,8	24,9	6,0	32,1
								6,5	8,5
								7,0	1,6

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
23.05.00	0	15,3	10,7	8,26	2,00	2,0	31,8	Atmosphäre	903,1
	2	15,2	10,5	8,14		2,0	24,3	0,0	552,8
	4	12,3	11,4	8,61		2,3	30,5	0,5	316,7
	6	8,5	13,8	9,92		2,5	32,8	1,0	254,9
	8	5,5	6,7	8,57		2,8	29,5	1,5	181,5
	10	4,7	5,7	8,30		3,0	30,1	2,0	136,6
	12	4,7	5,1	8,15		1,5	26,1	2,5	103,6
	14	4,6	4,3	7,98		2,8	25,1	3,0	84,5
	16	4,7	3,1	7,87		3,2	21,0	3,5	64,6
	18	4,7	0,5	7,64		2,8	14,2	4,0	49,9
	19	4,8	0,3	7,52				4,5	35,1
	Quelle	11,3	11,1	8,49		5,2	36,7	5,0	12,3
	Zulauf	11,2	11,3	8,10		2,5	28,3	5,5	3,1
	Ablauf	15,5	11,5	8,56		1,6	25,1	6,0	1,1
								6,5	0,4
								7,0	0,2
06.06.00	0	19,4	8,4	8,17	3,10	0,6	25,4	Atmosphäre	386,2
	2	17,6	8,4	8,31		0,2	25,2	0,0	230,5
	4	15,0	8,3	8,30		1,1	24,9	0,5	180,4
	6	9,1	11,2	10,18		0,7	24,6	1,0	135,9
	8	6,0	7,0	9,01		0,8	25,8	1,5	110,0
	10	4,8	5,0	8,54		0,7	25,8	2,0	91,0
	12	4,7	4,1	8,34		1,7	26,2	2,5	80,3
	14	4,7	2,3	8,13		4,1	23,2	3,0	65,1
	16	4,7	1,0	8,00		3,4	24,5	3,5	51,6
	18	4,8	0,4	7,78		2,2	8,9	4,0	43,6
	19	4,8	0,3	7,52				4,5	35,3
	Quelle	11,9	9,9	7,79		1,6	36,5	5,0	29,1
	Zulauf	12,1	9,5	7,59		1,7	26,2	5,5	23,7
	Ablauf	19,0	9,4	7,94		1,1	26,3	6,0	16,7
								6,5	8,6
								7,0	2,4
20.06.00	0	23,1	6,4	8,00	3,60	0,6	23,6	Atmosphäre	2324,0
	2	21,8	6,1	7,96		0,5	22,0	0,0	1627,8
	4	16,9	5,4	7,96		0,2	24,1	0,5	1190,4
	6	10,6	7,7	9,28		1,4	24,4	1,0	952,4
	8	6,0	5,8	8,28		2,6	26,1	1,5	845,7
	10	4,8	4,3	7,92		0,6	25,4	2,0	662,7
	12	4,1	3,5	7,82		2,0	25,3	2,5	524,9
	14	4,1	2,2	7,78		0,6	25,5	3,0	426,9
	16	4,1	1,5	7,70		4,1	19,0	3,5	318,7
	18	4,8	1,2	7,57		0,8	8,1	4,0	277,3
	19	4,8	1,2	7,33				4,5	224,7
	Quelle	14,9	16,2	8,00		3,3	34,1	5,0	182,9
	Zulauf	15,8	12,3	7,76		1,7	53,5	5,5	153,8
	Ablauf	23,9	12,5	8,20				6,0	120,6
								6,5	94,5
								7,0	79,2
04.07.00	0	21,0	7,2	8,15	4,00	1,0	21,3	Atmosphäre	1511,5
	2	20,9	6,8	7,96		0,2	21,1	0,0	856,7
	4	18,9	7,1	7,86		1,9	23,5	0,5	704,3
	6	11,3	9,9	9,08		2,6	24,7	1,0	515,4
	8	6,7	6,2	8,10		1,3	25,9	1,5	388,0
	10	5,2	4,2	7,91		1,6	25,6	2,0	318,4
	12	4,7	1,7	7,81		2,9	24,8	2,5	272,5
	14	4,7	0,9	7,76		4,1	21,0	3,0	226,8
	16	4,7	0,5	7,67		3,3	18,0	3,5	186,6
	18	4,8	0,4	7,42		1,8	8,6	4,0	166,6
	19	4,8	0,4	7,31				4,5	130,9
	Quelle					1,2	38,6	5,0	98,7
	Zulauf	13,9	8,3	8,14		4,2	40,8	5,5	76,4
	Ablauf	20,7	9,9	8,37		0,7	22,0	6,0	62,0
								6,5	54,8
								7,0	43,5
18.07.00	0	16,4	6,4	7,94	5,40	0,8	22,0	Atmosphäre	761,7
	2	16,3	6,1	7,80		0,9	21,8	0,0	433,6
	4	16,3	5,9	7,80		1,4	22,2	0,5	356,2
	6	13,7	6,9	8,57		1,8	22,8	1,0	281,6
	8	7,2	4,9	8,01		2,2	25,0	1,5	200,6
	10	5,5	3,9	7,92		1,1	25,1	2,0	184,4
	12	5,0	1,1	7,83		2,9	22,3	2,5	146,3
	14	4,9	0,6	7,73		3,4	20,4	3,0	125,4
	16	4,9	0,5	7,62		3,7	17,9	3,5	104,0
	18	4,9	0,4	7,46		3,5	8,2	4,0	83,5
	19	5,0	0,4	7,20				4,5	68,1
	Quelle					5,6	37,8	5,0	55,0
	Zulauf	11,4	9,9	8,08		2,9	46,7	5,5	44,9
	Ablauf	16,1	11,0	8,27		1,0	21,4	6,0	36,6
								6,5	30,3
								7,0	25,3

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
01.08.00	0	19,6	8,7	8,53	4,30	0,3	21,2	Atmosphäre	2258,0
	2	18,8	7,3	8,35		0,6	20,7	0,0	1530,0
	4	17,9	6,4	8,35		0,4	19,9	0,5	1182,4
	6	14,2	6,6	8,50		1,7	22,2	1,0	992,7
	8	7,9	5,1	8,44		1,1	24,3	1,5	763,9
	10	5,7	4,9	8,36		1,4	22,7	2,0	656,6
	12	5,0	1,1	8,66		0,7	19,3	2,5	459,4
	14	5,0	0,7	8,39		2,5	18,0	3,0	411,0
	16	4,9	0,5	8,31		0,9	17,2	3,5	333,3
	18	5,0	0,4	7,98		1,9	4,3	4,0	274,9
	19	5,0	0,4	6,84				4,5	202,0
	Quelle					1,6	37,9	5,0	186,8
	Zulauf	14,5	9,9	9,09		1,7	38,7	5,5	146,0
	Ablauf	19,5	8,8	8,66		0,3	20,1	6,0	130,9
								6,5	104,3
								7,0	86,7
15.08.00	0	22,9	8,5	9,14	1,00	0,7	18,3	Atmosphäre	2154,0
	2	22,2	8,2	9,07		0,3	19,1	0,0	1576,0
	4	19,2	7,3	8,73		1,5	20,6	0,5	1287,0
	6	14,5	7,3	8,79		1,5	21,9	1,0	929,7
	8	8,1	5,2	8,57		1,3	23,6	1,5	546,0
	10	6,0	5,0	8,56		1,1	23,1	2,0	338,9
	12	5,2	0,5	8,36		0,9	19,2	2,5	231,6
	14	5,1	0,4	8,31		1,1	16,5	3,0	198,6
	16	5,0	0,3	8,17		1,0	17,3	3,5	128,5
	18	5,0	0,3	7,64		0,5	12,4	4,0	109,0
	19	5,0	0,3	7,73				4,5	83,9
	Quelle	15,7	9,4	8,45		0,7	25,1	5,0	63,6
	Zulauf	15,7	8,4	8,33		0,5	47,4	5,5	54,6
	Ablauf	22,7	8,2	8,96		0,3	20,1	6,0	39,1
								6,5	31,9
								7,0	23,8
30.08.00	0	20,4	8,7	8,90	2,70	0,6	17,8	Atmosphäre	1872,6
	2	20,2	7,3	8,70		0,6	18,5	0,0	1223,1
	4	19,8	5,8	8,70		0,8	18,9	0,5	823,9
	6	14,7	5,6	8,50		1,7	22,0	1,0	515,9
	8	8,8	4,4	8,30		3,3	22,6	1,5	395,5
	10	6,0	3,2	8,10		1,9	20,9	2,0	299,4
	12	5,3	1,1	8,10		2,9	17,4	2,5	236,1
	14	5,2	0,6	8,00		2,5	15,7	3,0	163,6
	16	5,1	0,4	7,90		2,9	13,5	3,5	119,9
	18	5,1	0,4	7,60		4,6	6,8	4,0	83,4
	19	5,1	0,4	7,40				4,5	58,0
	Quelle					6,3	39,6	5,0	43,4
	Zulauf	13,7	8,6	8,60		3,1	39,8	5,5	34,0
	Ablauf	20,4	9,2	9,00		0,9	18,0	6,0	25,1
								6,5	19,9
								7,0	14,1
12.09.00	0	18,3	8,6	7,60	4,30	1,0	18,4	Atmosphäre	895,1
	2	17,9	7,6	8,60		0,5	18,7	0,0	530,2
	4	17,2	6,9	8,50		1,6	18,4	0,5	415,7
	6	15,5	7,5	8,70		1,4	19,3	1,0	313,9
	8	9,4	4,9	8,30		2,2	22,2	1,5	282,6
	10	6,4	3,3	8,20		3,5	20,3	2,0	189,8
	12	5,5	0,4	8,00		2,0	15,0	2,5	162,7
	14	5,3	0,3	8,00		2,8	14,2	3,0	126,4
	16	5,2	0,3	8,00		2,3	12,9	3,5	105,1
	18	5,2	0,3	7,70		3,2	3,9	4,0	84,8
	19	5,1	0,3	7,50				4,5	71,0
	Quelle	15,0	8,4	8,00		6,8	39,4	5,0	57,4
	Zulauf	13,2	8,0	8,10		2,7	46,3	5,5	47,9
	Ablauf	18,5	8,7	8,20		1,5	18,7	6,0	38,4
								6,5	29,5
								7,0	19,0
26.09.00	0	16,3	6,7	8,40	4,70	1,3	16,9	Atmosphäre	1963,3
	2	16,0	5,7	8,20		1,2	17,7	0,0	1182,2
	4	15,7	4,6	8,00		1,3	16,6	0,5	898,7
	6	15,2	4,4	8,20		1,4	17,9	1,0	695,9
	8	9,8	3,1	8,00		1,6	18,8	1,5	533,9
	10	6,5	1,5	7,90		2,9	15,6	2,0	407,2
	12	5,6	0,7	7,90		2,6	11,6	2,5	316,4
	14	5,4	0,5	7,80		0,8	12,2	3,0	252,3
	16	5,4	0,4	7,80		3,0	12,6	3,5	196,3
	18	5,2	0,4	7,60		3,2	3,5	4,0	152,8
	19	5,2	0,4	7,50				4,5	117,9
	Quelle					4,6	34,9	5,0	94,9
	Zulauf	12,4	7,5	8,12		3,3	40,5	5,5	74,0
	Ablauf	16,2	8,6	8,50		1,2	19,4	6,0	56,2
								6,5	37,2
								7,0	21,3

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
10.10.00	0	13,0	9,0	7,90		0,7	20,9	Atmosphäre	189,4
	2	13,0	8,7	7,80				0,0	109,9
	4	13,0	8,4	7,70				0,5	60,3
	6	12,8	8,2	7,70				1,0	41,6
	8	10,1	4,6	7,60				1,5	28,9
	10	6,8	1,6	7,60				2,0	21,2
	12	5,6	0,3	7,60				2,5	17,7
	14	5,5	0,3	7,50				3,0	9,8
	16	5,5	0,3	7,50				3,5	8,4
	18	5,4	0,3	7,40				4,0	6,6
	19	5,4	0,3	7,30				4,5	4,3
	Quelle	10,3	9,4	7,90		2,6	31,3	5,0	3,1
	Zulauf	9,4	9,3	7,70		1,6	22,8	5,5	2,0
	Ablauf	12,6	10,4	8,20		1,7	21,9	6,0	1,4
								6,5	0,9
								7,0	0,7
24.10.00	0	11,4	10,5	8,40	2,40	2,5	23,1	Atmosphäre	771,5
	2	11,4	10,0	8,10		0,6	22,0	0,0	376,1
	4	11,3	9,6	8,00		0,3	22,9	0,5	239,0
	6	11,3	9,2	7,90		1,3	23,8	1,0	149,7
	8	11,1	8,3	7,90		1,0	23,3	1,5	98,7
	10	7,1	0,7	7,70		3,3	18,1	2,0	88,0
	12	5,8	0,5	7,60		3,2	12,9	2,5	73,7
	14	5,6	0,4	7,70		0,9	10,9	3,0	50,2
	16	5,6	0,4	7,70		2,3	10,8	3,5	34,5
	18	5,5	0,3	7,60		3,8	6,2	4,0	22,5
	19	5,3	0,3	7,60				4,5	15,4
	Quelle	11,7	9,6	8,40		2,0	39,3	5,0	11,4
	Zulauf	10,2	9,2	7,90		4,4	18,7	5,5	8,3
	Ablauf	11,4	11,0	8,30		0,6	23,5	6,0	5,1
								6,5	3,1
								7,0	2,0
07.11.00	0	8,6	8,4	8,10	1,80	2,6	24,4	Atmosphäre	
	2	8,6	7,9	8,00		2,7	24,2	0,0	
	4	8,6	7,6	7,70		2,7	24,0	0,5	
	6	8,6	7,5	7,70		2,6	24,7	1,0	
	8	8,6	7,4	7,80		2,4	24,8	1,5	
	10	8,5	7,0	7,80		2,5	25,1	2,0	
	12	6,1	0,7	7,60		3,5	14,2	2,5	
	14	5,8	0,3	7,60		3,8	11,0	3,0	
	16	5,7	0,3	7,60		3,4	9,2	3,5	
	18	5,6	0,3	7,60		3,9	5,0	4,0	
	19	5,6	0,3	7,60				4,5	
	Quelle	9,3	9,8	8,50		6,3	39,0	5,0	
	Zulauf	8,3	9,8	7,70		3,3	35,3	5,5	
	Ablauf	8,3	9,4	8,00		2,8	26,6	6,0	
								6,5	
								7,0	
21.11.00	0	6,7	8,3	7,84	1,75	1,7	23,0	Atmosphäre	159,5
	2	6,7	8,4	7,86		2,0	23,2	0,0	109,3
	4	6,7	8,2	7,63		2,0	23,0	0,5	51,7
	6	6,7	8,1	7,64		2,2	23,8	1,0	34,5
	8	6,7	8,0	7,65		2,1	21,0	1,5	24,2
	10	6,7	7,9	7,68		2,0	23,5	2,0	18,5
	12	6,7	8,0	7,75		1,6	23,3	2,5	13,4
	14	6,5	3,0	7,72		1,5	21,7	3,0	9,5
	16	5,9	0,4	7,59		2,9	7,5	3,5	5,8
	18	5,8	0,3	7,55		1,2	5,8	4,0	3,8
	19	5,8	0,3	7,50				4,5	2,6
	Quelle	8,5	9,8	7,80		3,3	36,9	5,0	1,8
	Zulauf	6,6	11,2	7,83		2,0	35,2	5,5	1,1
	Ablauf	6,3	9,4	8,21		1,2	24,0	6,0	0,7
								6,5	0,4
								7,0	0,3
05.12.00	0	6,4	8,9	8,36	2,10	2,0	23,4	Atmosphäre	1027,0
	2	6,4	8,3	8,00		1,5	18,8	0,0	305,5
	4	6,4	8,4	7,95		2,7	23,8	0,5	225,1
	6	6,4	8,6	7,95		2,4	21,8	1,0	122,2
	8	6,4	8,6	7,95		2,6	23,5	1,5	75,5
	10	6,3	8,0	7,95		1,1	22,9	2,0	43,2
	12	6,3	6,9	7,96		2,7	21,9	2,5	27,2
	14	6,3	3,9	7,96		1,4	18,0	3,0	17,3
	16	6,1	0,6	7,88		2,9	14,0	3,5	11,5
	18	6,1	0,5	7,81		2,6	11,1	4,0	7,5
	19	6,0	0,5	7,76				4,5	4,7
	Quelle	10,3	7,2	8,22		3,2	36,1	5,0	3,0
	Zulauf	6,5	9,3	8,03		1,9	33,3	5,5	2,0
	Ablauf	6,2	8,5	8,41		2,1	24,0	6,0	1,4
								6,5	0,9
								7,0	0,6

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
19.12.00	0	5,8	8,9	8,36	1,30	3,0	23,3	Atmosphäre	87,6
	2	5,8	9,0	7,96		3,1	23,6	0,0	52,6
	4	5,8	9,1	7,77		2,5	23,8	0,5	33,4
	6	5,8	9,1	7,74		4,0	23,8	1,0	21,8
	8	5,8	8,9	7,73		3,0	23,8	1,5	13,7
	10	5,8	8,9	7,76		3,0	23,8	2,0	7,9
	12	5,8	9,0	7,84		2,8	23,8	2,5	5,0
	14	5,8	9,0	7,88		1,9	24,0	3,0	3,4
	16	5,8	8,8	7,92		2,5	23,7	3,5	2,2
	18	5,8	8,4	7,91		3,7	23,3	4,0	1,4
	19	5,9	8,0	7,64				4,5	0,9
	Quelle	8,5	9,3	7,75		5,4	30,1	5,0	0,6
	Zulauf	6,1	11,4	7,97		2,6	29,5	5,5	0,4
	Ablauf	5,6	9,4	8,12		2,3	24,0	6,0	0,2
								6,5	0,1
								7,0	0,1
30.01.01	0	1,8		8,40		0,4	29,9	Atmosphäre	1876,5
	2	3,1		8,08		0,2	25,0	0,0	985,1
	4	3,2		7,88		0,7	24,8	0,5	584,7
	6	3,2		7,80		1,7	21,8	1,0	289,0
	8	3,3		7,80		0,6	24,7	1,5	201,2
	10	3,4		7,79		1,5	22,8	2,0	121,3
	12	3,5		7,80		0,3	25,9	2,5	77,2
	14	3,7		7,81		2,1	23,6	3,0	48,1
	16	3,8		7,82		2,0	22,6	3,5	30,1
	18	3,9		7,83		1,9	25,7	4,0	19,9
	19	4,0		7,77				4,5	13,2
	Quelle							5,0	8,7
	Zulauf	3,8		8,13		0,2	30,0	5,5	6,1
	Ablauf	3,0		8,68		1,6	31,1	6,0	4,0
								6,5	2,7
								7,0	1,8
13.02.01	0	4,7		8,72		1,7	24,9	Atmosphäre	
	2	4,5		8,40		2,2	25,0	0,0	
	4	4,4		8,23		0,6	25,1	0,5	
	6	4,4		8,18		4,9	25,3	1,0	
	8	4,4		8,16		1,3	25,1	1,5	
	10	4,3		8,15		2,3	25,1	2,0	
	12	4,2		8,16		0,5	24,8	2,5	
	14	4,0		8,08		2,0	20,4	3,0	
	16	4,0		8,05		1,7	20,7	3,5	
	18	4,0		8,02		2,6	18,7	4,0	
	19	4,1		8,02				4,5	
	Quelle	8,3		7,45		2,6	28,9	5,0	
	Zulauf	6,6		7,61		1,2	20,3	5,5	
	Ablauf	4,9		7,56		1,3	24,7	6,0	
								6,5	
								7,0	
13.03.01	0	5,0	12,8	8,32		0,6	24,8	Atmosphäre	409,3
	2	5,0	13,0	8,13		2,2	24,8	0,0	263,2
	4	5,0	13,0	7,98		1,2	24,7	0,5	115,5
	6	4,9	13,0	7,86		2,2	24,9	1,0	68,0
	8	4,6	12,8	7,82		1,3	24,7	1,5	37,0
	10	4,2	12,1	7,79		1,1	24,6	2,0	30,4
	12	4,0	11,1	7,77		2,4	24,9	2,5	20,9
	14	4,0	8,1	7,73		1,1	23,1	3,0	9,3
	16	4,1	2,5	7,66		0,3	19,8	3,5	5,0
	18	4,2	0,8	7,65		2,1	17,4	4,0	3,3
	19	4,2	0,4	7,63				4,5	1,4
	Quelle							5,0	0,8
	Zulauf		12,8	7,91		2,1	30,7	5,5	0,6
	Ablauf		13,5	8,42		1,3	25,4	6,0	0,3
								6,5	0,2
								7,0	0,1
27.03.01	0	6,0	12,3	8,20	1,50	2,0	24,6	Atmosphäre	310,3
	2	6,0	12,2	7,94		2,2	24,6	0,0	199,2
	4	5,9	12,2	7,82		1,8	24,5	0,5	101,6
	6	5,5	12,0	7,79		2,9	24,1	1,0	79,0
	8	5,0	11,7	7,75		2,6	24,6	1,5	43,1
	10	4,8	11,3	7,74		2,8	24,5	2,0	26,3
	12	4,4	9,7	7,76		3,0	23,7	2,5	17,6
	14	4,3	6,2	7,71		3,4	21,6	3,0	11,7
	16	4,3	2,7	7,65		2,3	20,5	3,5	6,8
	18	4,3	0,3	7,62		3,5	18,4	4,0	4,0
	19	4,4	0,1	7,58				4,5	2,4
	Quelle	8,5	10,9	8,16		1,0	54,1	5,0	1,5
	Zulauf	4,9	12,3	8,09		2,7	28,3	5,5	1,0
	Ablauf	5,7	12,1	7,95		2,6	25,0	6,0	0,6
								6,5	0,4
								7,0	0,3

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
10.04.01	0	8,6	13,1	8,42		3,0	23,6	Atmosphäre	236,7
	2	8,6	13,1	8,12		2,9	23,7	0,0	117,9
	4	8,4	12,8	7,98		2,8	23,9	0,5	
	6	7,1	12,6	7,81		1,6	24,0	1,0	
	8	5,0	11,3	7,71		1,3	25,4	1,5	
	10	4,6	10,9	7,73		1,5	24,1	2,0	
	12	4,6	8,3	7,72		2,3	23,4	2,5	
	14	4,3	4,9	7,68		1,7	21,4	3,0	
	16	4,4	2,1	7,63		2,4	19,5	3,5	
	18	4,4	4,0	7,58		1,4	22,1	4,0	
	19	4,4	0,1	7,54				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	8,4	12,2	7,89		1,4	13,8	5,5	
	Ablauf	8,7	13,4	8,58		3,1	23,8	6,0	
								6,5	
								7,0	
24.04.01	0	9,4	14,7	8,19	1,00	0,7	23,3	Atmosphäre	1997,2
	2	8,4	14,9	8,06		2,1	23,3	0,0	1230,2
	4	7,7	14,1	7,89		1,4	23,6	0,5	863,0
	6	7,3	13,4	7,82		3,8	23,8	1,0	614,0
	8	5,3	10,6	7,68		1,1	24,7	1,5	290,9
	10	4,6	8,5	7,65		2,3	23,9	2,0	152,1
	12	4,5	6,1	7,59		2,0	22,3	2,5	113,0
	14	4,4	4,1	7,54		2,2	21,2	3,0	68,9
	16	4,4	2,4	7,50		2,2	19,8	3,5	50,3
	18	4,4	0,9	7,46		1,9	18,9	4,0	38,2
	19	4,4	1,0	7,31				4,5	27,7
	Quelle	8,6	10,9	7,81		2,7	31,7	5,0	19,5
	Zulauf	8,2	12,4	8,04		2,3	20,6	5,5	13,8
	Ablauf	9,4	15,3	8,37		1,8	23,2	6,0	8,9
								6,5	5,9
								7,0	3,8
08.05.01	0	12,1	13,2	8,24	1,00	30,3	21,6	Atmosphäre	638,1
	2	11,9	13,3	8,07		3,1	21,8	0,0	401,0
	4	9,1	13,7	7,98		3,3	21,8	0,5	254,8
	6	7,4	12,9	7,84		3,5	22,7	1,0	144,2
	8	5,2	9,8	7,65		3,7	23,6	1,5	94,7
	10	4,6	7,8	7,62		3,7	23,0	2,0	63,9
	12	4,5	5,3	7,58		3,9	21,9	2,5	45,6
	14	4,5	3,2	7,54		1,3	20,2	3,0	33,2
	16	4,4	1,2	7,48		1,1	18,9	3,5	24,9
	18	4,5	0,1	7,46		3,8	17,1	4,0	17,8
	19	4,5	0,1	7,38				4,5	12,0
	Quelle	10,4	10,2	8,14		5,6	29,2	5,0	8,1
	Zulauf	11,0	10,8	8,07		3,7	18,5	5,5	5,1
	Ablauf	12,4	13,4	8,28		3,2	21,5	6,0	3,1
						0,10	1,3	6,5	1,9
								7,0	1,2
22.05.01	0	16,8	11,6	8,42	2,15	1,9	20,5	Atmosphäre	2335,0
	2	16,2	12,1	8,35		2,4	20,6	0,0	1666,4
	4	10,0	15,2	8,73		3,4	21,7	0,5	1179,5
	6	7,6	14,2	8,43		3,0	22,8	1,0	780,3
	8	5,4	8,1	7,97		4,0	23,3	1,5	600,2
	10	4,7	6,4	7,75		3,8	22,6	2,0	401,2
	12	4,6	4,9	7,73		4,2	21,6	2,5	288,0
	14	4,5	3,0	7,67		4,5	20,1	3,0	198,2
	16	4,5	0,6	7,62		4,6	18,3	3,5	144,4
	18	4,5	0,1	7,58		4,6	15,0	4,0	99,8
	19	4,5	0,1	7,50				4,5	69,4
	Quelle	11,7	9,7	8,31		4,2	33,2	5,0	54,5
	Zulauf	12,7	9,7	8,05		3,1	17,5	5,5	39,7
	Ablauf	17,4	12,1	8,48		3,0	20,1	6,0	28,9
								6,5	20,7
								7,0	11,8
06.06.01	0	17,4	10,2	8,19	2,20	2,3	19,3	Atmosphäre	2575,0
	2	16,8	10,3	8,13		2,3	19,4	0,0	1914,5
	4	12,1	14,7	8,72		2,7	21,3	0,5	1092,1
	6	8,1	15,4	8,95		2,3	19,2	1,0	931,4
	8	5,9	10,1	8,18		3,2	22,9	1,5	686,7
	10	4,9	5,2	7,98		3,8	22,2	2,0	538,1
	12	4,7	4,0	7,89		3,2	21,4	2,5	349,9
	14	4,6	1,6	7,83		3,5	19,4	3,0	278,7
	16	4,6	0,3	7,79		3,4	16,6	3,5	180,5
	18	4,6	0,3	7,76		3,6	13,0	4,0	140,5
	19	4,7	0,2	7,49				4,5	116,7
	Quelle							5,0	77,7
	Zulauf	13,0	10,7	7,98		3,9	21,7	5,5	89,9
	Ablauf	17,4	11,4	8,56		2,2	18,8	6,0	63,0
								6,5	36,9
								7,0	24,4

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
19.06.01	0	17,2	10,8		2,75	2,3	18,0	Atmosphäre	1276,7
	2	17,0	10,8			2,3	18,0	0,0	887,3
	4	14,5	15,0			2,4	20,0	0,5	597,7
	6	9,4	17,0			2,9	21,9	1,0	480,4
	8	7,3	11,7			3,3	21,6	1,5	329,4
	10	5,8	4,8			3,8	21,7	2,0	268,6
	12	5,2	3,0			3,8	20,5	2,5	221,2
	14	5,0	1,3			4,0	18,4	3,0	162,3
	16	4,8	0,2			4,1	15,8	3,5	110,6
	18	4,8	0,2			4,2	13,2	4,0	77,4
	19	4,9	0,2					4,5	57,0
	Quelle							5,0	43,5
	Zulauf					4,1	19,6	5,5	33,6
	Ablauf					2,0	18,1	6,0	25,8
								6,5	20,3
								7,0	16,1
03.07.01	0	21,6	8,8	7,95	4,40	2,1	17,1	Atmosphäre	2158,0
	2	21,4	8,7	7,74		2,0	17,0	0,0	1658,0
	4	16,1	12,6	7,84		2,7	20,0	0,5	1320,0
	6	9,3	15,2	8,67		3,3	21,0	1,0	1044,0
	8	6,2	17,3	9,24		3,4	21,2	1,5	793,7
	10	4,9	4,0	7,84		3,9	21,5	2,0	605,7
	12	4,6	2,2	7,67		4,1	20,2	2,5	436,9
	14	4,6	0,1	7,63		4,3	17,4	3,0	338,0
	16	4,6	0,1	7,59		4,4	13,9	3,5	244,8
	18	4,7	0,1	7,48		5,2	5,2	4,0	201,3
	19	4,7	0,1	7,46				4,5	158,2
	Quelle							5,0	126,5
	Zulauf	15,0	8,7	7,90		5,1	26,2	5,5	83,3
	Ablauf	22,9	10,2	8,37		2,0	17,1	6,0	65,2
								6,5	52,1
								7,0	37,1
17.07.01	0	19,5	10,0	8,42	4,35	0,6	17,1	Atmosphäre	2195,0
	2	19,2	10,0	8,36		1,2	16,9	0,0	1530,8
	4	19,0	10,0	8,28		1,9	17,5	0,5	1276,4
	6	10,4	13,5	13,42		3,0	21,7	1,0	967,9
	8	6,9	14,3	10,37		1,6	20,5	1,5	740,0
	10	5,1	2,7	9,31		3,6	21,5	2,0	596,8
	12	4,7	1,8	8,91		2,2	21,0	2,5	488,4
	14	4,6	0,2	8,71		4,2	18,3	3,0	376,3
	16	4,6	0,2	8,75		3,9	7,4	3,5	296,0
	18	4,7	0,3	7,98		2,6	6,7	4,0	239,8
	19	4,7	0,1	8,76				4,5	185,5
	Quelle							5,0	148,3
	Zulauf	13,7	8,4	8,41		2,3	12,4	5,5	117,2
	Ablauf	20,1	9,9	8,92		1,8	17,7	6,0	94,4
								6,5	61,7
								7,0	21,2
31.07.01	0	23,8	9,8	8,25		1,6	17,3	Atmosphäre	1931,2
	2	23,6	10,0	8,05		1,4	16,9	0,0	1222,7
	4	19,4	9,2	8,01		0,9	17,3	0,5	983,0
	6	12,1	9,4	10,05		2,4	21,4	1,0	687,9
	8	6,7	5,2	8,50		3,4	21,0	1,5	541,4
	10	5,3	1,7	7,93		0,6	21,5	2,0	438,4
	12	4,8	0,8	7,73		1,2	20,9	2,5	345,8
	14	4,7	0,2	7,66		3,4	17,8	3,0	217,9
	16	4,7	0,1	7,62		2,7	11,4	3,5	212,7
	18	4,8	0,1	7,52		3,8	2,0	4,0	166,7
	19	4,8	0,1	7,44				4,5	138,8
	Quelle							5,0	110,9
	Zulauf	16,6	8,2	7,69		4,1	33,1	5,5	89,8
	Ablauf	24,1	10,1	8,27		0,6	17,4	6,0	58,3
								6,5	21,3
								7,0	7,5
14.08.01	0	20,8	10,9		3,85	1,3	16,7	Atmosphäre	1996,2
	2	20,3	11,0			1,6	16,5	0,0	1383,0
	4	19,2	11,4			2,0	17,2	0,5	1110,6
	6	14,2	23,5			3,1	20,1	1,0	863,8
	8	8,0	18,9			3,4	21,3	1,5	688,3
	10	6,3	1,6			3,5	23,0	2,0	527,6
	12	5,5	0,2			3,4	20,3	2,5	407,6
	14	5,2	0,1			3,8	17,7	3,0	324,6
	16	5,1	0,1			3,3	12,1	3,5	247,4
	18	5,1	0,1			4,5	1,8	4,0	199,9
	19	5,1	0,1					4,5	158,3
	Quelle							5,0	125,3
	Zulauf	15,4	9,7			3,1	29,6	5,5	86,7
	Ablauf	20,6	11,7			0,8	17,2	6,0	36,2
								6,5	13,9
								7,0	6,0

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m²]
28.08.01	0	22,1	11,9	9,82	2,50	0,7	16,0	Atmosphäre	648,2
	2	22,1	11,7	8,88		1,5	16,1	0,0	247,2
	4	20,8	12,1	8,98		1,2	16,2	0,5	145,5
	6	14,3	13,6	10,42		2,4	19,5	1,0	160,6
	8	7,3	7,6	8,50		2,9	20,6	1,5	157,0
	10	5,4	1,5	8,13		2,2	22,2	2,0	114,0
	12	4,9	0,6	8,01		3,7	19,6	2,5	87,5
	14	4,8	0,3	7,72		4,1	14,8	3,0	65,6
	16	4,8	0,2	7,73		3,1	9,0	3,5	55,4
	18	4,9	0,2	7,52		4,6	< 0,1	4,0	40,1
	19	4,9	0,1	7,50				4,5	29,4
	Quelle							5,0	20,4
	Zulauf	13,0	9,0	8,08		3,0	25,4	5,5	10,8
	Ablauf	22,6	12,7	9,11		1,4	16,0	6,0	5,5
								6,5	3,1
								7,0	1,7
11.09.01	0	15,3	15,6	9,52		2,0	14,4	Atmosphäre	655,2
	2	15,3	15,7	9,40		2,0	14,0	0,0	463,0
	4	15,3	15,7	9,36		2,0	15,3	0,5	314,4
	6	15,3	15,3	9,40		1,8	14,3	1,0	193,1
	8	7,3	8,0	8,13		3,4	18,7	1,5	139,9
	10	5,7	0,2	7,84		3,9	17,9	2,0	94,0
	12	5,1	0,2	7,74		4,0	9,0	2,5	67,0
	14	4,9	0,2	7,67		4,4	12,8	3,0	48,6
	16	4,9	0,1	7,61		4,4	7,8	3,5	34,7
	18	5,0	0,1	7,36		4,6	< 1,0	4,0	25,0
	19	5,0	0,1	7,29				4,5	17,7
	Quelle							5,0	12,5
	Zulauf	10,9	11,3	8,85		4,9	16,7	5,5	8,5
	Ablauf	15,2	15,2	9,60		1,9	13,5	6,0	6,1
								6,5	4,3
								7,0	2,0
25.09.01	0	13,1	15,4	9,60	2,20	1,1	13,9	Atmosphäre	267,3
	2	13,1	15,4	9,36		1,0	13,9	0,0	208,3
	4	13,0	15,2	9,32		1,0	13,8	0,5	122,9
	6	12,8	14,8	9,31		1,3	13,7	1,0	77,5
	8	8,0	4,7	8,19		3,0	17,6	1,5	59,6
	10	5,8	1,0	7,77		2,6	17,9	2,0	48,4
	12	5,1	0,1	7,61		2,7	12,7	2,5	36,2
	14	5,1	0,1	7,57		3,4	11,5	3,0	25,8
	16	4,9	0,1	7,57		3,3	7,4	3,5	19,0
	18	5,0	0,1	7,38		3,7	< 1,0	4,0	13,4
	19	5,0	0,1	7,23				4,5	9,7
	Quelle							5,0	6,9
	Zulauf	10,1	10,5	7,79		4,7	28,6	5,5	4,6
	Ablauf	13,1	15,5	9,05		1,0	10,4	6,0	2,9
								6,5	2,0
								7,0	1,2
09.10.01	0	13,8	14,6	8,71	1,75	2,3	13,5	Atmosphäre	256,7
	2	13,8	14,7	8,89		1,5	13,5	0,0	187,1
	4	13,8	14,6	8,83		1,6	13,7	0,5	111,7
	6	12,8	13,8	8,73		2,0	13,6	1,0	69,3
	8	9,3	5,4	7,71		3,0	16,4	1,5	33,1
	10	5,8	0,2	7,49		2,7	17,3	2,0	24,5
	12	5,2	0,1	7,39		4,0	17,0	2,5	17,0
	14	5,1	0,1	7,34		3,6	11,3	3,0	12,5
	16	5,0	0,1	7,30		2,9	7,5	3,5	9,4
	18	5,0	0,1	7,14		4,8	< 1,0	4,0	6,7
	19	5,0	0,1	7,12				4,5	4,8
	Quelle							5,0	3,6
	Zulauf	11,2	10,1	7,79		3,8	29,5	5,5	2,5
	Ablauf	13,8	14,6	9,06		2,5	13,5	6,0	1,6
								6,5	1,1
								7,0	0,7
23.10.01	0	13,1	15,4	9,04	1,60	1,7	12,7	Atmosphäre	368,6
	2	13,1	15,4	8,92		1,4	12,8	0,0	232,4
	4	13,1	15,4	8,87		1,7	12,9	0,5	142,5
	6	12,9	14,9	8,85		2,0	12,9	1,0	79,6
	8	9,3	3,3	7,65		2,7	15,3	1,5	55,1
	10	6,2	0,1	7,43		2,9	15,8	2,0	34,1
	12	5,4	0,1	7,31		1,9	12,6	2,5	23,0
	14	5,2	0,1	7,30		3,3	10,1	3,0	15,2
	16	5,1	0,1	7,21		3,7	0,8	3,5	10,2
	18	5,1	0,1	7,11				4,0	6,7
	19	5,1	0,1	7,03				4,5	4,5
	Quelle							5,0	3,0
	Zulauf	10,3	10,6	8,26		3,8	23,4	5,5	2,0
	Ablauf	13,3	15,7	9,08		1,8	12,8	6,0	1,4
								6,5	0,8
								7,0	0,4

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
06.11.01	0	10,2	12,8	8,72		1,4	9,7	Atmosphäre	
	2	10,2	12,7	8,62				0,0	
	4	10,2	12,6	8,60				0,5	
	6	10,2	12,4	8,59				1,0	
	8	10,0	12,2	8,62				1,5	
	10	6,2	0,1	7,77				2,0	
	12	5,6	1,2	7,60				2,5	
	14	5,2	0,9	7,51				3,0	
	16	5,1	0,6	7,32				3,5	
	18	5,1	0,6	7,22				4,0	
	19	5,1	0,3	7,15				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	6,2	11,3	7,80		2,4	24,6	5,5	
	Ablauf	9,1	13,3	8,78		1,8	12,6	6,0	
						0,18	0,36	6,5	
								7,0	
20.11.01	0	6,4	10,8	8,72	1,15	0,8	13,7	Atmosphäre	
	2	6,4	10,8	8,49		0,9	10,9	0,0	
	4	6,4	10,8	8,41		1,7	12,4	0,5	
	6	6,4	10,8	8,37		1,8	13,6	1,0	
	8	6,4	10,8	8,38		1,3	12,6	1,5	
	10	6,4	10,8	8,39		1,1	13,6	2,0	
	12	6,1	7,2	8,22		1,7	13,1	2,5	
	14	5,5	0,5	7,99		2,8	8,4	3,0	
	16	5,2	0,3	7,81		2,8	0,4	3,5	
	18	5,2	0,4	7,56		2,7	< 1,0	4,0	
	19	5,2	0,4	7,49				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	5,9	11,6	8,42		1,8	27,0	5,5	
	Ablauf	6,0	11,4	9,09		2,1	13,9	6,0	
								6,5	
								7,0	
04.12.01	0	6,5	11,2	7,87	1,15	1,6	16,8	Atmosphäre	
	2	6,2	10,6	7,77		1,5	16,1	0,0	
	4	6,1	10,7	7,68		1,5	15,8	0,5	
	6	5,5	10,0	7,60		1,3	14,8	1,0	
	8	5,5	9,8	7,59		1,5	14,1	1,5	
	10	5,5	10,5	7,59		0,9	14,8	2,0	
	12	5,5	9,7	7,59		1,6	14,6	2,5	
	14	5,5	8,1	7,57		1,7	13,5	3,0	
	16	5,4	1,7	7,51		1,6	9,8	3,5	
	18	5,3	1,0	7,21		2,7	0,7	4,0	
	19	5,2	1,1	7,23				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	7,6	11,8	7,98		2,2	40,3	5,5	
	Ablauf	6,5	11,3	8,30		1,6	18,7	6,0	
								6,5	
								7,0	
06.02.02	0	4,8	9,3	8,30	1,40	1,8	20,0	Atmosphäre	
	2	4,6	9,7	7,98		1,9	20,2	0,0	
	4	4,6	9,7	7,91		1,9	21,0	0,5	
	6	4,6	9,3	7,88		1,9	21,0	1,0	
	8	4,6	9,3	7,85		2,0	20,9	1,5	
	10	4,6	11,3	7,87		1,7	20,3	2,0	
	12	4,5	10,8	7,90		2,0	20,2	2,5	
	14	4,5	11,2	7,93		2,1	20,2	3,0	
	16	4,3	9,2	7,92		2,2	20,2	3,5	
	18	4,1	2,3	7,76		2,1	12,2	4,0	
	19	4,1	0,8	7,67				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	6,0	13,1	8,23		2,5	24,4	5,5	
	Ablauf	4,9	12,6	8,50		2,2	21,3	6,0	
								6,5	
								7,0	
05.03.02	0	4,5	11,7	8,38	1,00	2,5	24,2	Atmosphäre	
	2	4,4	11,5	8,19		2,9	24,3	0,0	
	4	4,3	11,3	8,06		2,9	24,3	0,5	
	6	4,3	11,3	8,00		2,8	24,6	1,0	
	8	4,3	11,2	7,98		2,2	24,6	1,5	
	10	4,4	10,6	7,92		2,6	24,2	2,0	
	12	4,4	16,5	7,92		2,1	23,5	2,5	
	14	4,4	17,3	7,97		2,6	24,4	3,0	
	16	4,4	17,0	7,94		2,8	23,0	3,5	
	18	4,4	16,9	7,98		3,0	24,2	4,0	
	19	4,4	19,2	7,68				4,5	
	Quelle					4,8	34,7	5,0	
	Zulauf	4,5	12,0	7,99		2,6	26,5	5,5	
	Ablauf	4,5	12,2	8,00		2,1	24,7	6,0	
						0,0	0,7	6,5	
								7,0	

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
19.03.02	0	6,8	13,5	8,35	1,05	2,8	20,3	Atmosphäre	
	2	6,8	13,7	8,06		3,0	20,3	0,0	
	4	6,6	13,7	7,93		3,0	20,6	0,5	
	6	5,3	13,0	7,88		2,5	20,3	1,0	
	8	4,8	12,8	7,87		2,9	20,5	1,5	
	10	4,8	12,5	7,85		1,8	21,1	2,0	
	12	4,7	12,6	7,89		3,1	20,9	2,5	
	14	4,6	12,0	7,97		2,9	19,9	3,0	
	16	4,6	10,6	8,12		2,5	19,6	3,5	
	18	4,6	10,3	8,10		2,9	18,9	4,0	
	19	4,6	9,9	8,05				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	6,9	12,5	8,92		2,4	20,3	5,5	
	Ablauf	6,9	13,6	9,31		2,9	20,3	6,0	
								6,5	
								7,0	
03.04.02	0	10,9	14,5	8,55	1,80	2,4	20,8	Atmosphäre	
	2	8,7	15,8	8,15		3,3	20,4	0,0	
	4	7,2	10,7	8,22		3,1	20,9	0,5	
	6	6,5	9,4	8,15		2,9	21,3	1,0	
	8	5,0	8,4	7,95		3,4	21,0	1,5	
	10	4,8	8,2	7,85		2,6	20,5	2,0	
	12	4,7	17,5	7,76		2,7	20,2	2,5	
	14	4,7	15,8	7,63		3,4	19,5	3,0	
	16	4,7	14,5	7,62		3,3	18,5	3,5	
	18	4,7	14,0	7,65		4,2	17,9	4,0	
	19	4,7	14,6	7,65				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	14,5	12,1	7,90		3,6	17,0	5,5	
	Ablauf	11,9	15,0	8,40		3,3	20,6	6,0	
								6,5	
								7,0	
16.04.02	0	9,0	13,2	8,99	2,60	1,7	20,3	Atmosphäre	370,2
	2	9,1	13,2	8,74		2,3	20,2	0,0	230,3
	4	8,8	13,7	8,77		3,0	20,2	0,5	169,0
	6	6,4	15,8	9,36		3,1	20,1	1,0	116,8
	8	5,1	11,0	8,57		3,3	20,7	1,5	83,9
	10	4,8	9,7	8,52		3,2	20,0	2,0	59,9
	12	4,8	8,6	8,34		3,1	20,0	2,5	48,3
	14	4,8	7,5	8,13		3,2	18,9	3,0	37,4
	16	4,8	6,3	6,12		3,2	19,2	3,5	29,8
	18	4,8	5,3	6,00		3,8	17,8	4,0	22,3
	19	4,8	5,3	6,43				4,5	16,5
	Quelle							5,0	11,8
	Zulauf	5,5	12,3	8,37		2,8	12,0	5,5	7,9
	Ablauf	9,0	13,5	8,90		2,7	20,2	6,0	4,9
								6,5	1,6
								7,0	0,5
30.04.02	0	10,0	13,2	9,30	1,95	2,4	19,3	Atmosphäre	1897,5
	2	9,9	13,2	9,20		1,9	19,5	0,0	1840,6
	4	9,9	12,7	9,10		2,2	19,8	0,5	1288,4
	6	9,4	12,2	9,07		2,5	19,5	1,0	880,7
	8	5,4	8,5	8,24		2,9	20,0	1,5	505,7
	10	4,9	7,3	8,11		3,0	20,2	2,0	234,1
	12	4,9	18,9	7,65		1,4	20,1	2,5	215,4
	14	4,9	23,4	7,98		1,7	19,5	3,0	74,8
	16	4,9	23,4	7,94		3,0	20,5	3,5	56,3
	18	4,9	23,4	7,92		3,1	18,2	4,0	37,4
	19	4,9	23,4	7,80				4,5	26,3
	Quelle							5,0	28,0
	Zulauf	10,7	10,9	8,40		2,4	14,6	5,5	25,0
	Ablauf	10,9	12,3	9,45		2,4	19,3	6,0	11,8
								6,5	4,6
								7,0	1,5
14.05.02	0	14,8	11,3	8,60	4,00	2,4	18,8	Atmosphäre	
	2	14,5	11,7	8,62		2,3	18,8	0,0	
	4	10,9	12,8	9,25		2,5	18,8	0,5	
	6	9,4	14,9	9,92		1,7	17,9	1,0	
	8	5,2	7,3	8,66		2,1	18,1	1,5	
	10	4,9	6,6	8,44		2,0	18,4	2,0	
	12	4,9	12,7	8,31		2,8	18,3	2,5	
	14	4,9	12,9	8,24		2,4	18,2	3,0	
	16	4,9	12,2	8,15		2,4	18,3	3,5	
	18	4,9	11,6	8,00		3,3	18,6	4,0	
	19	4,9	11,8	8,02				4,5	
	Quelle							5,0	
	Zulauf	10,6	10,6	8,35		3,0	18,0	5,5	
	Ablauf	15,0	11,8	8,35		1,7	18,0	6,0	
								6,5	
								7,0	

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
28.05.02	0	16,6	11,2	8,33	4,10	2,1	17,7	Atmosphäre	2431,0
	2	16,4	11,3	8,43		2,1	17,2	0,0	1799,6
	4	13,0	13,8	8,81		2,6	18,0	0,5	1444,7
	6	9,8	17,5	9,82		2,7	17,8	1,0	1315,8
	8	5,8	6,6	8,52		3,2	18,8	1,5	846,9
	10	5,0	5,7	8,22		3,4	19,5	2,0	738,5
	12	4,9	10,0	8,20		3,5	19,4	2,5	583,7
	14	4,9	9,8	8,07		3,6	17,9	3,0	488,4
	16	4,9	10,8	7,93		3,5	15,6	3,5	377,5
	18	5,0	15,3	7,89		3,3	19,0	4,0	282,2
	19	5,0	19,5	7,73				4,5	239,6
	Quelle							5,0	188,0
	Zulauf	12,1	10,8	7,95		3,6	17,3	5,5	155,4
	Ablauf	16,8	11,1	8,33		1,9	17,3	6,0	125,7
								6,5	92,5
								7,0	52,6
25.06.02	0	22,2	12,9	7,90	3,50	1,0	15,1	Atmosphäre	2205,0
	2	21,9	12,1	8,52		1,0	15,4	0,0	1673,0
	4	18,2	12,8	8,97		1,3	16,1	0,5	1373,0
	6	11,9	14,6	10,71		2,2	16,9	1,0	1083,0
	8	6,5	5,4	9,12		2,7	17,1	1,5	836,9
	10	5,2	2,3	8,96		3,3	19,0	2,0	682,9
	12	5,1	18,5	8,79		3,2	19,0	2,5	531,9
	14	5,0	18,6	8,72		3,8	7,5	3,0	404,4
	16	5,0	18,4	8,71		3,9	14,8	3,5	332,3
	18	5,0	20,3	8,50		4,3	32,6	4,0	271,5
	19	5,0	23,5	8,10				4,5	225,2
	Quelle							5,0	167,7
	Zulauf	14,6	7,3	8,25		5,1	15,7	5,5	106,4
	Ablauf	23,5	9,2	8,51		1,4	17,3	6,0	37,5
								6,5	14,6
								7,0	6,5
09.07.02	0	20,4	12,9	9,55	2,15	1,2	14,6	Atmosphäre	2214,0
	2	19,1	13,5	9,30		1,0	14,8	0,0	1751,3
	4	17,9	14,4	9,51		1,2	14,9	0,5	1302,1
	6	13,3	20,3	11,11		1,8	15,7	1,0	1021,9
	8	6,5	5,7	7,73		2,2	17,3	1,5	758,5
	10	5,2	1,8	7,41		2,9	18,5	2,0	540,0
	12	4,9	1,6	7,39		2,9	18,0	2,5	458,1
	14	4,9	15,4	7,41		2,8	17,4	3,0	343,9
	16	4,9	16,1	7,48		2,9	14,1	3,5	275,6
	18	5,0	18,1	7,69		2,4	5,7	4,0	203,1
	19	5,0	23,6	7,56				4,5	148,1
	Quelle							5,0	106,3
	Zulauf	15,6	8,7	6,96		3,6	27,2	5,5	57,9
	Ablauf	21,2	12,6	8,79		1,1	14,9	6,0	25,8
								6,5	12,4
								7,0	5,9
23.07.02	0	19,8	11,7	9,68	2,60	0,8	13,8	Atmosphäre	1218,7
	2	19,7	11,9	9,65		0,8	13,5	0,0	934,4
	4	19,2	14,6	9,69		0,9	13,8	0,5	592,7
	6	13,2	22,2	10,57		1,4	14,8	1,0	397,2
	8	6,8	2,6	7,59		1,9	17,1	1,5	295,1
	10	5,3	0,8	7,48		2,4	19,0	2,0	273,0
	12	5,0	2,4	7,47		2,6	18,0	2,5	216,9
	14	5,0	2,2	7,47		2,6	15,2	3,0	151,9
	16	5,0	2,2	7,56		2,7	12,9	3,5	111,9
	18	5,1	2,0	7,55		3,0	1,7	4,0	82,5
	19	5,1	2,0	7,49				4,5	51,4
	Quelle							5,0	29,3
	Zulauf	13,8	8,6	7,80		3,5	30,0	5,5	12,6
	Ablauf	20,2	11,8	9,58		1,0	13,5	6,0	6,7
								6,5	3,3
								7,0	1,4
06.08.02	0	21,4	12,5	9,61	1,50	0,9	12,4	Atmosphäre	2409,0
	2	20,9	11,9	9,85		0,9	12,0	0,0	1842,0
	4	20,1	14,0	10,15		0,9	12,2	0,5	1364,0
	6	13,7	22,3	11,01		1,4	14,0	1,0	856,0
	8	7,2	2,2	6,30		2,1	16,1	1,5	595,0
	10	5,4	0,3	7,33		2,4	17,5	2,0	432,0
	12	5,1	2,1	7,31		2,5	16,1	2,5	295,0
	14	5,0	2,0	7,30		2,7	14,5	3,0	197,1
	16	5,0	2,1	7,37		2,3	11,5	3,5	144,5
	18	5,1	2,1	7,37		3,1	2,2	4,0	105,7
	19	5,1	2,2	7,35				4,5	61,5
	Quelle							5,0	29,5
	Zulauf	14,1	7,2	7,40		3,2	19,3	5,5	13,7
	Ablauf	21,3	12,6	10,26		1,0	12,2	6,0	6,5
								6,5	2,9
								7,0	1,4

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
20.08.02	0	22,9	13,8	10,48	1,05	1,0	10,8	Atmosphäre	697,5
	2	22,2	16,6	10,42		0,5	10,7	0,0	431,8
	4	20,1	16,3	10,29		0,6	11,4	0,5	263,1
	6	14,1	21,3	10,23		1,7	13,6	1,0	150,9
	8	7,9	1,5	7,54		2,3	10,7	1,5	108,3
	10	5,7	0,2	7,33		2,5	14,3	2,0	74,8
	12	5,1	2,9	7,36		3,0	15,0	2,5	47,4
	14	5,1	3,1	7,42		3,1	12,3	3,0	28,9
	16	5,1	3,1	7,42		3,2	9,0	3,5	17,1
	18	5,1	3,3	7,36		3,7	<0,1	4,0	10,4
	19	5,1	3,6	7,43				4,5	6,9
	Quelle							5,0	4,4
	Zulauf	15,7	6,8	7,37		3,3	14,7	5,5	2,9
	Ablauf	23,0	13,9	10,36		0,8	11,2	6,0	1,8
								6,5	1,0
								7,0	0,5
03.09.02	0	19,8	15,3	9,82	1,60	1,1	10,1	Atmosphäre	2208,0
	2	19,7	15,1	10,07		1,1	10,3	0,0	1491,0
	4	19,5	14,9	9,15		1,1	10,1	0,5	1125,0
	6	13,8	17,2	9,01		1,9	13,8	1,0	703,0
	8	8,4	0,9	6,92		2,6	13,1	1,5	462,0
	10	5,6	0,2	7,25		3,3	14,1	2,0	309,0
	12	5,3	2,4	7,41		3,0	13,5	2,5	195,0
	14	5,2	2,5	7,31		2,7	11,8	3,0	134,0
	16	5,1	2,6	7,42		3,2	9,2	3,5	81,5
	18	5,2	2,5	7,33		4,4	<0,1	4,0	56,0
	19	5,2	2,5	6,85				4,5	38,0
	Quelle							5,0	22,0
	Zulauf	14,2	19,1	6,95		4,2	27,0	5,5	12,0
	Ablauf	20,4	19,6	9,82		1,5	10,4	6,0	6,7
								6,5	3,5
								7,0	1,7
17.09.02	0	17,7	14,6	10,23	2,10	1,8	9,0	Atmosphäre	2531,0
	2	17,7	14,6	10,29		1,6	8,9	0,0	1761,8
	4	17,6	14,4	10,25		1,6	9,1	0,5	1190,0
	6	13,7	13,9	9,07		2,4	13,2	1,0	783,1
	8	8,6	0,3	7,63		3,3	14,5	1,5	507,6
	10	5,9	0,3	7,44		3,5	15,1	2,0	341,3
	12	5,3	0,9	7,45		3,3	13,6	2,5	250,6
	14	5,3	0,9	7,30		3,7	10,5	3,0	176,7
	16	5,2	0,9	7,30		3,8	7,1	3,5	118,2
	18	5,2	1,0	6,94		4,4	0,2	4,0	90,0
	19	5,2	1,0	7,02				4,5	60,8
	Quelle							5,0	43,4
	Zulauf	12,2	8,6	7,96		4,4	25,0	5,5	29,7
	Ablauf	18,2	14,5	9,88		1,7	9,7	6,0	16,2
								6,5	7,1
								7,0	3,6
01.10.02	0	13,9	13,5	10,17	2,15	2,3	9,7	Atmosphäre	2185,0
	2	13,8	13,4	10,02		2,1	9,3	0,0	1362,2
	4	13,8	13,4	10,01		1,8	9,7	0,5	924,4
	6	13,5	12,2	9,63		2,1	9,7	1,0	596,3
	8	8,9	0,3	8,17		3,2	13,0	1,5	393,6
	10	6,0	0,4	7,93		3,4	13,5	2,0	237,8
	12	5,5	0,2	7,15		3,6	10,6	2,5	167,1
	14	5,3	0,1	7,46		3,8	9,6	3,0	160,9
	16	5,2	0,1	7,68		4,0	6,3	3,5	79,1
	18	5,2	0,1	7,10		5,2	<0,1	4,0	51,1
	19	5,3	0,1	7,17				4,5	34,8
	Quelle							5,0	24,5
	Zulauf	10,5	7,8	7,13		4,7	22,4	5,5	17,0
	Ablauf	14,6	12,3	10,15		1,8	9,5	6,0	11,7
								6,5	7,1
								7,0	3,2
15.10.02	0	11,0		9,46	1,60	2,5	10,6	Atmosphäre	173,7
	2	11,1		9,33		2,4	9,7	0,0	131,7
	4	11,1		9,18		2,3	10,0	0,5	89,7
	6	11,0		9,19		1,9	9,8	1,0	50,5
	8	10,8		8,70		2,4	10,0	1,5	28,4
	10	6,0		7,43		3,8	11,7	2,0	18,7
	12	5,7		6,90		3,8	9,9	2,5	11,4
	14	5,6		6,68		3,9	9,3	3,0	7,6
	16	5,4		6,52		3,9	6,0	3,5	8,0
	18	5,4		6,45		4,8	1,0	4,0	3,2
	19	5,4		6,19				4,5	1,9
	Quelle							5,0	1,1
	Zulauf	9,2		7,95		4,5	17,1	5,5	0,7
	Ablauf	11,1		9,37		2,3	10,1	6,0	0,5
								6,5	0,3
								7,0	0,2

ANHANG

Datum	Tiefenprofil [m]	T_{H2O} [°C]	O_2 [mg/l]	pH-Wert	Sichttiefe [m]	Si [mg/l]	NO_3 [µg/l]	Tiefenprofil [m]	PAR [µmol/s/m^2]
29.10.02	0	9,2	9,0		0,90	2,8	12,8	Atmosphäre	1430,4
	2	9,1	9,0			2,9	13,4	0,0	841,9
	4	9,0	9,0			2,8	13,1	0,5	384,5
	6	9,0	9,0			2,9	13,3	1,0	167,8
	8	8,8	9,1			2,9	13,5	1,5	68,3
	10	8,8	9,1			2,9	13,8	2,0	31,4
	12	6,4	1,0			3,1	13,8	2,5	16,5
	14	5,9	1,0			4,0	6,9	3,0	7,3
	16	5,7	1,0			4,0	4,9	3,5	3,8
	18	5,5	1,0			5,1	<0,1	4,0	1,6
	19	5,4	1,0					4,5	0,7
	Quelle							5,0	0,4
	Zulauf	9,5	9,6			3,4	50,2	5,5	0,2
	Ablauf	9,3	9,7			2,8	21,4	6,0	0,1
								6,5	0,1
								7,0	0,0
12.11.02	0	8,1	9,4	7,63	1,00	2,0	18,6	Atmosphäre	90,0
	2	8,1	9,3	7,92		2,6	17,8	0,0	47,7
	4	8,1	9,3	7,90		2,6	17,0	0,5	24,4
	6	8,1	9,3	7,13		2,5	16,6	1,0	12,8
	8	8,1	9,1	7,49		2,6	16,6	1,5	6,2
	10	8,1	8,6	7,57		3,0	17,1	2,0	3,3
	12	7,7	7,9	7,39		3,1	15,7	2,5	1,8
	14	6,0	0,9	7,39		4,0	6,6	3,0	0,5
	16	5,7	0,9	6,74		4,4	3,2	3,5	0,2
	18	5,6	1,0	6,56		5,5	<0,1	4,0	0,1
	19	5,5	1,0	5,90				4,5	0,0
	Quelle							5,0	
	Zulauf	8,9	10,2	7,29		2,6	44,0	5,5	
	Ablauf	8,2	9,5	7,38		3,2	19,0	6,0	
								6,5	
								7,0	
26.11.02	0	7,6	9,0		1,40	3,9	18,4	Atmosphäre	493,2
	2	7,6	9,0			3,7	18,9	0,0	268,3
	4	7,6	9,0			3,5	19,1	0,5	146,4
	6	7,4	9,0			4,2	19,8	1,0	65,8
	8	7,4	9,0			3,8	19,2	1,5	34,0
	10	7,3	9,0			3,7	19,7	2,0	17,0
	12	7,1	9,1			4,0	19,8	2,5	9,6
	14	6,5	1,0			4,5	6,8	3,0	5,3
	16	5,8	0,9			5,1	2,3	3,5	2,9
	18	5,7	0,9			7,1	<0,1	4,0	1,5
	19	5,6	0,9					4,5	0,8
	Quelle							5,0	0,5
	Zulauf	8,3	9,8			4,7	35,2	5,5	
	Ablauf	7,8	9,3			4,0	20,7	6,0	
						< 0.02	2,5	6,5	
								7,0	
10.12.02	0	5,0	10,5	7,45	1,20	3,7	19,5	Atmosphäre	1525,2
	2	5,0	9,7	6,95		3,3	19,7	0,0	589,7
	4	5,0	6,2	6,89		3,9	19,9	0,5	325,8
	6	5,0	4,9	6,48		3,7	20,1	1,0	133,4
	8	5,0	5,3	6,54		3,9	20,1	1,5	64,6
	10	5,0	5,8	6,49		4,0	20,1	2,0	32,1
	12	5,0	6,1	6,57		3,8	20,1	2,5	16,2
	14	5,1	6,0	6,55		3,6	20,4	3,0	8,2
	16	5,0	6,8	6,52		4,0	20,2	3,5	4,5
	18	5,1	6,7	6,52		4,1	19,6	4,0	2,3
	19	5,6	1,2	5,68				4,5	1,3
	Quelle							5,0	0,7
	Zulauf	6,5				4,1	40,1	5,5	0,4
	Ablauf					4,0	20,9	6,0	0,2
								6,5	0,1
								7,0	0,1

STABILE SAUERSTOFFISOTOPE

HOLZMAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
18.05.99	0	-7,82	27.07.99	0	-6,45	21.09.99	0	-6,22
	2	-7,97		2	-6,58		2	-6,26
	4	-8,21		4	-7,68		4	-6,56
	6	-8,25		6	-8,28		6	-8,17
	8	-8,20		8	-8,21		8	-8,27
	10	-8,31		10	-8,25		10	-8,28
	12	-8,28		12	-8,23		12	-8,20
	14	-8,19		14	-8,23		14	-8,23
	16	-8,18		16	-8,23		16	-8,22
	18	-8,10		18	-8,26		18	-8,22
	ZU	-8,46		ZU	-8,10		ZU	
	AB	-7,85		AB	-6,50		AB	-6,11
	Q	-8,72		Q	-8,63		Q	-8,54
	N	-3,88		N	-5,63		N	-8,56
01.06.99	0	-7,61	10.08.99	0	-6,33	05.10.99	0	-6,48
	2	-7,80		2	-6,52		2	-6,45
	4	-8,12		4	-6,88		4	-6,54
	6	-8,19		6	-8,14		6	-6,57
	8	-8,18		8	-8,20		8	-8,21
	10	-8,22		10	-8,21		10	-8,21
	12	-7,96		12	-8,20		12	-8,25
	14	-8,08		14	-8,16		14	-8,10
	16	-8,12		16	-8,20		16	-8,27
	18	-8,23		18	-8,17		18	-8,24
	ZU	-8,45		ZU	-7,94		ZU	-7,98
	AB	-7,38		AB	-6,15		AB	-6,42
	Q	-8,65		Q	-8,55		Q	-8,54
	N	-4,56		N	-4,82		N	-6,42
15.06.99	0	-7,39	24.08.99	0	-6,32	19.10.99	0	-6,55
	2	-7,56		2	-6,45		2	-6,53
	4	-8,18		4	-6,54		4	-6,53
	6	-8,30		6	-8,11		6	-6,58
	8	-8,34		8	-8,20		8	-7,44
	10	-8,33		10	-8,19		10	-8,03
	12	-8,14		12	-8,19		12	-8,18
	14	-8,17		14	-8,20		14	-8,19
	16	-8,33		16	-8,21		16	-8,05
	18	-8,35		18	-8,15		18	-8,20
	ZU	-8,41		ZU	-7,95		ZU	-7,97
	AB	-7,24		AB	-6,25		AB	-6,46
	Q	-8,59		Q	-8,52		Q	-8,61
	N	-5,27		N	-5,74		N	-3,61
29.06.99	0	-7,13	24.08.99	0	-6,32	02.11.99	0	-6,74
	2	-7,16		2	-6,45		2	-6,76
	4	-8,16		4	-6,54		4	-6,77
	6	-8,21		6	-8,11		6	-6,73
	8	-8,28		8	-8,20		8	-6,92
	10	-8,25		10	-8,19		10	-8,00
	12	-8,23		12	-8,19		12	-8,12
	14	-8,23		14	-8,20		14	-8,09
	16	-8,31		16	-8,21		16	-8,06
	18	-8,38		18	-8,15		18	-8,10
	ZU	-8,21		ZU	-7,95		ZU	-7,78
	AB	-7,24		AB	-6,25		AB	-7,03
	Q	-8,68		Q	-8,52		Q	-8,06
	N	-6,40		N	-5,74		N	-9,48
13.07.99	0	-6,82	07.09.99	0	-6,14	16.11.99	0	-7,17
	2	-6,95		2	-6,22		2	-7,18
	4	-7,86		4	-6,46		4	-7,12
	6	-8,26		6	-8,18		6	-7,18
	8	-8,33		8	-8,26		8	-7,17
	10	-8,18		10	-8,21		10	-7,14
	12	-8,23		12	-8,20		12	-8,08
	14	-8,30		14	-8,22		14	-8,14
	16	-8,28		16	-8,29		16	-8,25
	18	-8,27		18	-8,29		18	-8,30
	ZU	-8,36		ZU	-8,20		ZU	-8,21
	AB	-6,70		AB	-6,24		AB	-7,25
	Q	-8,62		Q	-8,57		Q	-8,52
	N	-5,94		N	-2,70		N	-8,89

HOLZMAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
30.11.99	0	-7,27	28.03.00	0	-7,95	06.06.00	0	-7,31
	2	-7,22		2	-7,92		2	-7,24
	4	-7,23		4	-7,97		4	-7,34
	6	-7,19		6	-7,90		6	-7,76
	8	-7,22		8	-7,96		8	-7,85
	10	-7,23		10	-8,09		10	-7,82
	12	-7,23		12	-7,92		12	-7,91
	14	-7,13		14	-8,07		14	-7,97
	16	-7,53		16	-7,93		16	-7,86
	18	-7,73		18	-8,04		18	-8,07
	ZU	-8,47		ZU	-8,23		ZU	-7,78
	AB	-7,41		AB	-8,08		AB	-7,06
	Q	-8,54		Q	-8,61		Q	-8,30
	N	-12,2		N	-8,56		N	-5,52
14.12.99	0	-7,45	11.04.00	0	-7,88	20.06.00	0	-6,94
	2	-7,54		2	-7,85		2	-7,01
	4	-7,54		4	-7,93		4	-7,19
	6	-7,43		6	-7,96		6	-7,75
	8	-7,36		8	-7,91		8	-7,92
	10	-7,31		10	-7,89		10	-7,97
	12	-7,32		12	-7,93		12	-8,03
	14	-7,35		14	-7,87		14	-7,96
	16	-7,30		16	-7,95		16	-8,02
	18	-7,34		18	-7,97		18	-8,13
	ZU	-7,91		ZU	-8,20		ZU	-8,41
	AB	-7,41		AB	-7,92		AB	-6,93
	Q	-8,08		Q	-8,42		Q	-8,55
	N	-6,84		N	-10,53		N	-4,55
18.01.00	0	-7,83	26.04.00	0	-7,83	03.07.00	0	-6,88
	2	-7,77		2	-7,94		2	-6,99
	4	-7,87		4	-7,88		4	-7,18
	6	-7,74		6	-8,00		6	-7,72
	8	-7,86		8	-7,81		8	-7,85
	10			10	-7,87		10	-7,99
	12			12	-7,94		12	-8,07
	14			14	-8,04		14	-8,05
	16			16	-7,96		16	-8,07
	18			18	-7,86		18	-8,12
	ZU	-8,27		ZU	-8,33		ZU	-8,17
	AB	-7,92		AB	-7,75		AB	-6,77
	Q	-8,65		Q	-8,42		Q	-8,60
	N	-11,90		N	-10,45		N	-4,22
29.02.00	0	-7,91	09.05.00	0	-7,78	18.07.00	0	-6,93
	2	-8,01		2	-7,81		2	-6,95
	4	-7,97		4	-7,99		4	-6,92
	6	-8,02		6	-7,92		6	-7,18
	8	-8,03		8	-7,90		8	-7,78
	10	-7,98		10	-7,99		10	-7,78
	12	-8,10		12	-8,04		12	-7,91
	14	-7,94		14	-8,07		14	-7,88
	16	-8,02		16	-7,95		16	-7,83
	18	-7,99		18	-7,95		18	-7,98
	ZU	-8,42		ZU	-8,41		ZU	-8,17
	AB	-8,08		AB	-7,92		AB	-6,91
	Q	-8,54		Q	-8,53		Q	-8,50
	N	-7,96		N	-8,00		N	-8,38
14.03.00	0	-7,96	23.05.00	0	-7,44	01.08.00	0	-6,64
	2	-7,92		2	-7,62		2	-6,62
	4	-7,98		4	-7,81		4	-6,66
	6	-7,82		6	-8,01		6	-7,16
	8	-7,90		8	-7,94		8	-7,75
	10	-8,04		10	-7,98		10	-7,74
	12	-8,02		12	-7,95		12	-7,94
	14	-8,00		14	-7,91		14	-7,98
	16	-7,99		16	-8,01		16	-7,98
	18	-8,05		18	-7,98		18	-7,98
	ZU	-8,37		ZU	-8,26		ZU	-8,19
	AB	-8,01		AB	-7,59		AB	-6,90
	Q	-8,50		Q	-8,56		Q	-8,57
	N	-8,48		N	-3,93		N	-6,29

HOLZMAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
15.08.00	0	-6,25	24.10.00	0	-7,11	30.01.01	0	-8,16
	2	-6,34		2	-7,12		2	-8,11
	4	-6,56		4	-7,13		4	-8,11
	6	-7,04		6	-7,19		6	-8,04
	8	-7,74		8	-7,30		8	-7,96
	10	-7,71		10	-7,68		10	-8,04
	12	-7,97		12	-7,82		12	-7,89
	14	-8,06		14	-7,84		14	-7,96
	16	-7,98		16	-7,82		16	-7,93
	18	-8,06		18	-7,87		18	-8,03
	ZU	-8,30		ZU	-8,07		ZU	-8,35
	AB	-6,72		AB	-7,22		AB	-8,49
	Q	-8,56		Q	-8,48		Q	
	N	-4,34		N	-9,96		N	-10,84
29.08.00	0	-6,46	07.11.00	0	-7,47	13.02.01	0	-8,13
	2	-6,53		2	-7,44		2	-8,16
	4	-6,57		4	-7,44		4	-8,20
	6	-7,05		6	-7,45		6	-8,22
	8	-7,84		8	-7,52		8	-8,18
	10	-7,92		10	-7,50		10	-8,31
	12	-7,99		12	-7,85		12	-8,26
	14	-8,02		14	-7,97		14	-8,10
	16	-7,98		16	-7,94		16	-7,98
	18	-7,97		18	-7,99		18	-8,03
	ZU	-8,13		ZU	-8,45		ZU	-8,46
	AB	-6,55		AB	-7,55		AB	-8,15
	Q	-8,61		Q	-8,64		Q	-8,46
	N	-5,16		N	-10,51		N	-8,59
12.09.00	0	-6,63	21.11.00	0	-7,70	13.03.01	0	-8,29
	2	-6,69		2	-7,68		2	-8,31
	4	-6,75		4	-7,76		4	-8,26
	6	-7,00		6	-7,69		6	-8,32
	8	-7,83		8	-7,71		8	-8,22
	10	-7,90		10	-7,65		10	-8,29
	12	-7,97		12	-7,66		12	-8,28
	14	-8,00		14	-7,71		14	-8,36
	16	-8,08		16	-7,96		16	-8,16
	18	-8,04		18	-8,00		18	-8,12
	ZU	-8,30		ZU	-7,99		ZU	-8,57
	AB	-6,66		AB	-7,75		AB	-8,38
	Q	-8,70		Q	-8,64		Q	
	N	-5,89		N	-10,31		N	-9,01
26.09.00	0	-6,71	05.12.00	0	-7,70	27.03.01	0	-8,33
	2	-6,83		2	-7,73		2	-8,29
	4	-6,85		4	-7,72		4	-8,33
	6	-6,89		6	-7,80		6	-8,26
	8	-7,79		8	-7,70		8	-8,27
	10	-7,91		10	-7,67		10	-8,17
	12	-7,98		12	-7,59		12	-8,20
	14	-7,93		14	-7,80		14	-8,18
	16	-7,98		16	-7,82		16	-8,11
	18	-8,02		18	-7,85		18	-8,07
	ZU	-8,02		ZU	-8,16		ZU	-8,66
	AB	-6,78		AB	-7,75		AB	-8,44
	Q	-8,58		Q	-8,55		Q	-8,33
	N	-8,54		N	-12,06		N	-8,34
10.10.00	0	-7,06	19.12.00	0	-7,85	10.04.01	0	-8,25
	2	-7,08		2	-7,79		2	-8,29
	4	-7,11		4	-7,81		4	-8,20
	6	-7,09		6	-7,85		6	-8,25
	8	-7,59		8	-7,96		8	-8,25
	10	-7,84		10	-7,90		10	-8,22
	12	-7,84		12	-7,75		12	-8,13
	14	-7,86		14	-7,85		14	-8,06
	16	-7,88		16	-7,79		16	-8,12
	18	-7,95		18	-7,79		18	-8,13
	ZU	-8,00		ZU	-8,05		ZU	-8,35
	AB	-7,05		AB	-7,72		AB	-8,31
	Q	-8,39		Q	-8,40		Q	
	N	-9,33		N	-7,80		N	-8,06

ANHANG

HOLZMAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
24.04.01	0	-8,34	03.07.01	0	-7,15	11.09.01	0	-6,84
	2	-8,39		2	-7,21		2	-6,86
	4	-8,43		4	-7,85		4	-6,95
	6	-8,37		6	-8,20		6	-6,97
	8	-8,34		8	-8,22		8	-7,98
	10	-8,32		10	-8,31		10	-8,14
	12	-8,30		12	-8,27		12	-8,12
	14	-8,24		14	-8,19		14	-8,22
	16	-8,26		16	-8,23		16	-8,18
	18	-8,21		18	-8,30		18	-8,20
	ZU	-8,54		ZU	-8,39		ZU	-8,10
	AB	-8,30		AB	-7,21		AB	-6,85
	Q	-8,46		Q			Q	
	N	-10,16		N	-4,09		N	-7,44
08.05.01	0	-8,31	17.07.01	0	-7,02	25.09.01	0	-6,99
	2	-8,33		2	-6,96		2	-6,93
	4	-8,24		4	-7,16		4	-6,97
	6	-8,37		6	-8,10		6	-7,08
	8	-8,38		8	-8,17		8	-7,96
	10	-8,24		10	-8,26		10	-8,10
	12	-8,27		12	-8,24		12	-8,15
	14	-8,27		14	-8,20		14	-8,17
	16	-8,26		16	-8,16		16	-8,17
	18	-8,23		18	-8,18		18	-8,17
	ZU	-8,59		ZU	-7,94		ZU	-8,52
	AB	-8,34		AB	-7,07		AB	-7,06
	Q	-8,49		Q			Q	
	N	-7,24		N	-6,84		N	-11,52
22.05.01	0	-7,98	31.07.01	0	-6,72	09.10.01	0	-6,96
	2	-8,14		2	-6,75		2	-7,06
	4	-8,25		4	-7,07		4	-7,05
	6	-8,36		6	-8,10		6	-7,11
	8	-8,24		8	-8,17		8	-7,87
	10	-8,26		10	-8,16		10	-8,07
	12	-8,23		12	-8,19		12	-8,22
	14	-8,22		14	-8,14		14	-8,16
	16	-8,29		16	-8,17		16	-8,15
	18	-8,25		18	-8,18		18	-8,15
	ZU	-8,44		ZU	-8,26		ZU	-8,32
	AB	-8,01		AB	-7,06		AB	-7,06
	Q	-8,49		Q			Q	
	N	-6,52		N	-6,91		N	-5,82
06.06.01	0	-7,64	14.08.01	0	-6,69	23.10.01	0	-7,02
	2	-7,72		2	-6,75		2	-7,02
	4	-7,95		4	-6,88		4	-6,94
	6	-8,31		6	-8,04		6	-6,98
	8	-8,25		8	-8,12		8	-7,80
	10	-8,26		10	-8,19		10	-8,07
	12	-8,20		12	-8,30		12	-8,20
	14	-8,16		14	-8,23		14	-8,14
	16	-8,25		16	-8,25		16	-8,19
	18	-8,26		18	-8,19		18	-8,17
	ZU	-8,41		ZU	-8,27		ZU	-8,28
	AB	-7,64		AB	-6,94		AB	-7,01
	Q			Q			Q	
	N	-6,68		N	-5,62		N	-5,29
19.06.01	0	-7,53	26.08.01	0	-6,60	06.11.01	0	-7,06
	2	-7,58		2	-6,61		2	
	4	-7,96		4	-6,91		4	
	6	-8,31		6	-7,99		6	
	8	-8,30		8	-7,97		8	
	10	-8,30		10	-8,20		10	
	12	-8,26		12	-8,30		12	
	14	-8,17		14	-8,26		14	
	16	-8,16		16	-8,20		16	
	18	-8,25		18	-8,31		18	
	ZU	-8,43		ZU	-8,09		ZU	-8,23
	AB	-7,61		AB	-6,60		AB	-7,03
	Q			Q			Q	
	N	-8,03		N	-4,79		N	-6,98

HOLZMAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
20.11.01	0	-7,25	14.05.02	0	-7,67	23.07.02	0	-6,80
	2	-7,24		2	-7,72		2	-6,84
	4	-7,25		4	-7,68		4	-6,86
	6	-7,32		6	-7,69		6	-7,49
	8	-7,34		8	-7,93		8	-7,93
	10	-7,30		10	-7,88		10	-7,99
	12	-7,29		12	-7,84		12	-8,03
	14	-7,52		14	-7,78		14	-8,07
	16	-8,03		16	-8,00		16	-8,01
	18	-8,16		18	-7,95		18	-8,01
	ZU	-8,34		ZU	-7,91		ZU	-8,25
	AB	-7,30		AB	-7,75		AB	-6,83
	Q			Q			Q	
	N	-9,28		N	-8,77		N	-6,50
04.12.01	0	-7,53	28.05.02	0	-7,46	06.08.02	0	-6,56
	2	-7,52		2	-7,45		2	-6,68
	4	-7,46		4	-7,77		4	-6,71
	6	-7,47		6	-7,83		6	-7,43
	8	-7,46		8	-7,84		8	-7,89
	10	-7,60		10	-7,89		10	-7,88
	12	-7,81		12	-7,98		12	-7,93
	14	-7,83		14	-8,00		14	-7,91
	16	-8,11		16	-7,92		16	-7,88
	18	-8,20		18	-8,00		18	-7,80
	ZU	-8,26		ZU	-8,10		ZU	-7,85
	AB	-7,65		AB	-7,57		AB	-6,40
	Q			Q			Q	
	N	-9,21		N	-5,56		N	-5,48
06.02.02	0	-7,95	11.06.02	0	-7,22	20.08.02	0	-6,58
	2	-7,94		2	-7,26		2	-6,59
	4	-7,92		4	-7,59		4	-6,64
	6	-7,95		6	-7,77		6	-7,53
	8	-7,91		8	-7,89		8	-7,95
	10	-7,94		10	-7,93		10	-7,96
	12	-7,91		12	-7,95		12	-7,97
	14	-7,92		14	-7,97		14	-7,94
	16	-7,86		16	-7,94		16	-7,98
	18	-7,91		18	-8,02		18	-7,96
	ZU	-8,34		ZU	-8,14		ZU	-8,21
	AB	-7,94		AB	-7,21		AB	-6,51
	Q			Q			Q	
	N	-8,06		N	-5,80		N	-5,81
05.03.02	0	-7,97	25.06.02	0	-6,99	03.09.02	0	-6,45
	2	-7,97		2	-7,06		2	-6,55
	4	-7,93		4	-7,40		4	-6,65
	6	-7,93		6	-7,71		6	-7,42
	8	-7,96		8	-7,94		8	-7,91
	10	-7,93		10	-7,96		10	-7,89
	12	-7,95		12	-7,93		12	-7,84
	14	-7,96		14	-7,94		14	-7,99
	16	-7,95		16	-7,95		16	-7,95
	18	-7,92		18	-8,03		18	-7,95
	ZU	-8,10		ZU	-8,18		ZU	-7,82
	AB	-7,90		AB	-6,85		AB	-6,40
	Q	-8,44		Q			Q	
	N	-7,56		N	-6,04		N	-7,57
30.04.02	0	-7,78	09.07.02	0	-6,88	17.09.02	0	-6,36
	2	-7,81		2	-7,03		2	-6,39
	4	-7,76		4	-7,14		4	-6,46
	6	-7,76		6	-7,73		6	-7,18
	8	-7,80		8	-7,92		8	-7,80
	10	-7,85		10	-7,89		10	-7,95
	12	-7,91		12	-7,92		12	-7,94
	14	-7,77		14	-7,89		14	-7,81
	16	-7,89		16	-7,95		16	-7,76
	18	-7,91		18	-7,98		18	-7,85
	ZU	-8,19		ZU	-8,16		ZU	-7,91
	AB	-7,64		AB	-6,93		AB	-6,36
	Q			Q			Q	
	N	-12,20		N	-6,44		N	-7,39

HOLZMAAR und MEERFELDER MAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
01.10.02	0	-6,48
	2	-6,53
	4	-6,55
	6	-6,56
	8	-7,78
	10	-7,88
	12	-7,89
	14	-7,89
	16	-7,97
	18	-7,93
	ZU	-8,14
	AB	-6,49
	Q	
	N	-8,86
15.10.02	0	-6,73
	2	-6,76
	4	-6,77
	6	-6,79
	8	-6,71
	10	-7,89
	12	-7,93
	14	-7,95
	16	-7,90
	18	-8,01
	ZU	-8,04
	AB	-6,73
	Q	
	N	-6,51
29.10.02	0	-7,14
	2	-7,11
	4	-7,07
	6	-7,12
	8	-7,12
	10	-7,11
	12	-7,39
	14	-7,95
	16	-7,95
	18	-8,00
	ZU	-7,81
	AB	-7,19
	Q	
	N	-8,08
12.11.02	0	-7,28
	2	-7,23
	4	-7,17
	6	-7,14
	8	-7,20
	10	-7,30
	12	-7,36
	14	-7,82
	16	-7,82
	18	-7,81
	ZU	-7,85
	AB	-7,22
	Q	
	N	-10,34
26.11.02	0	-7,31
	2	-7,33
	4	-7,35
	6	-7,35
	8	-7,39
	10	-7,33
	12	-7,39
	14	-7,46
	16	-7,74
	18	-7,90
	ZU	-8,03
	AB	-7,12
	Q	
	N	-13,01
10.12.02	0	-7,55
	2	-7,54
	4	-7,53
	6	-7,39
	8	-7,35
	10	-7,55
	12	-7,55
	14	-7,53
	16	-7,50
	18	-7,62
	ZU	-8,03
	AB	-7,61
	Q	
	N	
Meerfelder Maar		
07.02.00	0	-5,61
	2	-5,71
	4	-5,79
	6	-5,87
	8	-5,83
	10	-5,86
	12	-5,90
	14	-5,97
	16	-5,99
	ZU	-8,75
21.02.00	0	-5,81
	2	-5,97
	4	-5,89
	6	-5,98
	8	-6,03
	10	-6,06
	12	-6,04
	14	-6,04
	16	-5,93
	ZU	
28.03.00	0	-6,09
	2	-6,11
	4	-6,19
	6	-6,17
	8	-6,16
	10	-6,14
	12	-6,25
	14	-6,16
	16	-6,22
	ZU	-8,67
13.04.00	0	-6,16
	2	-6,14
	4	-6,18
	6	-6,08
	8	-6,22
	10	-6,09
	12	-6,07
	14	-6,13
	16	-5,97
	ZU	-8,11
02.05.00	0	-5,99
	2	-5,99
	4	-6,02
	6	-6,13
	8	-6,13
	10	-6,07
	12	-6,10
	14	-6,06
	16	-6,00
	ZU	-8,53
16.05.00	0	-5,94
	2	-5,93
	4	-5,97
	6	-6,25
	8	-6,16
	10	-6,11
	12	-6,10
	14	-6,17
	16	-5,98
	ZU	-8,64
29.05.00	0	-5,84
	2	-5,89
	4	-5,94
	6	-6,26
	8	-6,01
	10	-6,14
	12	-6,18
	14	-6,14
	16	-6,18
	ZU	-8,71
19.06.00	0	-5,61
	2	-5,74
	4	-5,84
	6	-6,21
	8	-5,95
	10	-6,11
	12	-6,16
	14	-6,26
	16	-6,10
	ZU	-8,15
03.07.00	0	-5,58
	2	-5,56
	4	-5,66
	6	-6,22
	8	-6,08
	10	-6,13
	12	-6,29
	14	-6,30
	16	-6,31
	ZU	-8,37
17.07.00	0	-5,40
	2	-5,47
	4	-5,56
	6	-6,11
	8	-6,18
	10	-6,20
	12	-6,28
	14	-6,35
	16	-6,31
	ZU	-8,49
15.08.00	0	-5,44
	2	-5,51
	4	-5,52
	6	-6,06
	8	-6,14
	10	-6,25
	12	-6,33
	14	-6,24
	16	-6,28
	ZU	-9,05
29.08.00	0	-5,36
	2	-5,35
	4	-5,36
	6	-5,87
	8	-6,15
	10	-6,24
	12	-6,30
	14	-6,25
	16	-6,15
	ZU	-8,48

MEERFELDER MAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
25.09.00	0	-5,44	08.01.01	0	-5,68	22.05.01	0	-6,25
	2	-5,49		2	-5,77		2	-6,39
	4	-5,51		4	-5,74		4	-6,46
	6	-5,79		6	-5,68		6	-6,45
	8	-6,12		8	-5,62		8	-6,47
	10	-6,16		10	-5,71		10	-6,38
	12	-6,18		12	-5,75		12	-6,39
	14	-6,32		14	-5,71		14	-6,47
	16	-6,30		16	-5,66		16	-6,53
	ZU			ZU	-8,61		ZU	-8,32
10.10.00	0	-5,34	04.02.01	0	-5,79	12.06.01	0	-6,05
	2	-5,39		2	-5,83		2	-6,02
	4	-5,49		4	-5,73		4	-6,33
	6	-5,71		6	-5,77		6	-6,29
	8	-6,11		8	-5,99		8	-6,21
	10	-6,16		10	-6,22		10	-6,19
	12	-6,25		12	-6,10		12	-6,42
	14	-6,25		14	-6,22		14	-6,26
	16	-6,27		16	-5,92		16	-6,20
	ZU	-8,66		ZU			ZU	-8,06
23.10.00	0	-5,36	19.02.01	0	-6,20	26.06.01	0	-5,99
	2	-5,41		2	-6,25		2	-5,98
	4	-5,56		4	-6,31		4	-6,11
	6	-5,69		6	-6,20		6	-6,25
	8	-6,05		8	-6,21		8	-6,29
	10	-6,10		10	-6,33		10	-6,28
	12	-6,14		12	-6,28		12	-6,28
	14	-6,32		14	-6,40		14	-6,29
	16	-6,22		16	-6,23		16	
	ZU			ZU	-8,55		ZU	-8,31
09.11.00	0	-5,42	05.03.01	0	-6,17	16.07.01	0	-5,57
	2	-5,44		2	-6,14		2	-5,57
	4	-5,43		4	-6,21		4	-5,82
	6	-5,54		6	-6,29		6	-6,26
	8	-6,07		8	-6,23		8	-6,27
	10	-6,17		10	-6,12		10	-6,30
	12	-6,20		12	-6,17		12	-6,26
	14	-6,35		14	-6,33		14	-6,24
	16	-6,29		16	-6,34		16	-6,27
	ZU	-8,28		ZU	-8,41		ZU	-8,28
20.11.00	0	-5,73	27.03.01	0	-6,22	14.08.01	0	-5,52
	2	-5,67		2	-6,27		2	-5,63
	4	-5,79		4	-6,31		4	-5,72
	6	-5,72		6	-6,34		6	-6,25
	8	-5,86		8	-6,37		8	-6,37
	10	-5,97		10	-6,24		10	-6,45
	12	-5,92		12	-6,09		12	-6,44
	14	-6,29		14	-6,11		14	-6,52
	16	-6,24		16	-6,10		16	-6,50
	ZU	-8,34		ZU	-8,30		ZU	-8,26
04.12.00	0	-5,92	24.04.01	0	-6,28	27.08.01	0	-5,51
	2	-5,94		2	-6,45		2	-5,58
	4	-5,83		4	-6,49		4	-5,51
	6	-5,90		6	-6,40		6	-6,38
	8	-5,92		8	-6,42		8	-6,36
	10	-5,93		10	-6,41		10	-6,34
	12	-5,96		12	-6,39		12	-6,30
	14	-6,08		14	-6,35		14	-6,33
	16	-6,20		16	-6,32		16	-6,28
	ZU	-8,35		ZU	-8,21		ZU	-8,34
18.12.00	0	-6,15	08.05.01	0	-6,24	10.09.01	0	-5,47
	2	-6,15		2	-6,28		2	-5,46
	4	-6,09		4	-6,38		4	-5,55
	6	-6,10		6	-6,41		6	-6,26
	8	-6,03		8	-6,35		8	-6,34
	10	-6,10		10	-6,26		10	-6,37
	12	-6,08		12	-6,27		12	-6,46
	14	-6,15		14	-6,43		14	-6,55
	16	-6,10		16	-6,51		16	-6,60
	ZU	-8,16		ZU	-8,15		ZU	

ANHANG

MEERFELDER MAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW	Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
24.09.01	0	-5,33	19.02.02	0	-6,16	10.06.02	0	-5,95
	2	-5,35		2	-6,13		2	-6,02
	4	-5,52		4	-6,19		4	-6,06
	6	-6,29		6	-6,16		6	-6,25
	8	-6,46		8	-6,14		8	-6,38
	10	-6,48		10	-6,17		10	-6,37
	12	-6,35		12	-6,11		12	-6,33
	14	-6,40		14	-6,13		14	-6,33
	16	-6,43		16	-6,13		16	-6,21
	ZU	-8,14		ZU	-8,25		ZU	-8,20
15.10.01	0	-5,46	04.03.02	0	-6,12	24.06.02	0	-5,70
	2	-5,51		2	-6,11		2	-5,72
	4	-5,47		4	-6,10		4	-5,99
	6	-5,66		6	-6,13		6	-6,11
	8	-6,31		8	-6,12		8	-6,31
	10	-6,27		10	-6,18		10	-6,40
	12	-6,16		12	-6,13		12	-6,42
	14	-6,31		14	-6,13		14	-6,43
	16	-6,15		16	-6,19		16	-6,42
	ZU	-8,12		ZU	-8,24		ZU	-8,41
23.10.01	0	-5,47	18.03.02	0	-6,17	08.07.02	0	-5,63
	2	-5,57		2	-6,17		2	-5,67
	4	-5,63		4	-6,17		4	-5,71
	6	-5,64		6	-6,13		6	-6,02
	8	-5,83		8	-6,09		8	-6,27
	10	-5,79		10	-6,22		10	-6,38
	12	-5,74		12	-6,13		12	-6,38
	14	-5,94		14	-6,18		14	-6,39
	16	-6,08		16	-6,19		16	-6,40
	ZU	-7,95		ZU	-8,11		ZU	-8,23
12.11.01	0	-5,49	09.04.02	0	-6,23	22.07.02	0	-5,71
	2	-5,52		2	-6,26		2	-5,72
	4	-5,47		4	-6,27		4	-5,77
	6	-5,59		6	-6,28		6	-5,93
	8	-5,79		8	-6,29		8	-6,31
	10	-5,86		10	-6,34		10	-6,43
	12	-5,91		12	-6,24		12	-6,43
	14	-6,01		14	-6,18		14	-6,39
	16	-6,12		16	-6,21		16	-6,30
	ZU	-8,15		ZU	-8,53		ZU	-8,20
30.11.01	0	-5,52	22.04.02	0	-6,37	19.08.02	0	-5,39
	2	-5,64		2	-6,36		2	-5,36
	4	-5,71		4	-6,38		4	-5,45
	6	-5,55		6	-6,40		6	-5,55
	8	-5,65		8	-6,48		8	-6,09
	10	-5,84		10	-6,39		10	-6,34
	12	-5,92		12	-6,30		12	-6,34
	14	-5,98		14	-6,23		14	-6,24
	16	-6,08		16	-6,24		16	-6,25
	ZU	-8,26		ZU	-7,99		ZU	-8,01
10.12.01	0	-5,66	07.05.02	0	-6,24	02.09.02	0	-5,37
	2	-5,64		2	-6,25		2	-5,40
	4	-5,59		4	-6,25		4	-5,40
	6	-5,56		6	-6,26		6	-5,59
	8	-5,67		8	-6,28		8	-6,17
	10	-5,78		10	-6,27		10	-6,37
	12	-5,76		12	-6,25		12	-6,34
	14	-5,83		14	-6,24		14	-6,26
	16	-5,76		16	-6,26		16	-6,25
	ZU	-8,42		ZU	-8,33		ZU	-8,12
04.02.02	0	-6,05	27.05.02	0	-6,27	17.09.02	0	-5,45
	2	-6,07		2	-6,25		2	-5,40
	4	-6,10		4	-6,24		4	-5,45
	6	-6,03		6	-6,32		6	-5,48
	8	-6,06		8	-6,39		8	-5,93
	10	-6,11		10	-6,40		10	-6,39
	12	-6,09		12	-6,32		12	-6,38
	14	-6,03		14	-6,31		14	-6,38
	16	-6,06		16	-6,28		16	-6,39
	ZU	-8,48		ZU	-8,35		ZU	-7,98

MEERFELDER MAAR (Wasserkörper)

Datum	Tiefe [m]	$\delta^{18}O_{H2O}$ vs. V-SMOW
30.09.02	0	-5,46
	2	-5,49
	4	-5,45
	6	-5,61
	8	-5,90
	10	-6,41
	12	-6,45
	14	-6,40
	16	-6,41
	ZU	-7,96
15.10.02	0	-5,43
	2	-5,46
	4	-5,49
	6	-5,53
	8	-5,70
	10	-6,24
	12	-6,25
	14	-6,28
	16	-6,23
	ZU	-8,10
11.11.02	0	-5,43
	2	-5,46
	4	-5,46
	6	-5,51
	8	-5,71
	10	-5,76
	12	-5,85
	14	-6,23
	16	-6,05
	ZU	-8,16
28.11.02	0	-5,52
	2	-5,61
	4	-5,61
	6	-5,59
	8	-5,60
	10	-5,64
	12	-5,75
	14	-6,02
	16	-5,86
09.12.02	0	-6,23
	2	-6,21
	4	-6,23
	6	-6,30
	8	-6,26
	10	-6,37
	12	-6,40
	14	-6,38
	16	-6,38
	ZU	

ANHANG

BIOGENER OPAL

Probe	δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
Laborstandard (Kieselgur)	
- Reproduzierbarkeit -	
Labstd.	25,68
Labstd.	25,66
Labstd.	25,57
Labstd.	25,65
Labstd.	25,54
Labstd.	25,66
Labstd.	25,55
Labstd.	25,54
Labstd.	25,67
Labstd.	25,55
Labstd.	25,63
Labstd.	25,61
Labstd.	25,55
Labstd.	25,67
Labstd.	25,56
Labstd.	25,59
Labstd.	25,62
Labstd.	25,70
Labstd.	25,57
Labstd.	25,65
Labstd.	25,51
Labstd.	25,54
Labstd.	25,62
Labstd.	25,56
Labstd.	25,74
Labstd.	25,59
Labstd.	25,64
Labstd.	25,62
Labstd.	25,59
Labstd.	25,60
Labstd.	25,59
Labstd.	25,59
Labstd.	25,64
Labstd.	25,50
Labstd.	25,57
Labstd.	25,54
Labstd.	25,58
Labstd.	25,54
Labstd.	25,56
Labstd.	25,61

Probe		δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
Internationaler Standard		
NBS 28		9,42
NBS 28		9,88
NBS 28		9,51
NBS 28		9,50
NBS 28		9,59
NBS 28		9,33
NBS 28		9,89
NBS 28		9,77
NBS 28		9,47
NBS 28		9,55
NBS 28		9,43
NBS 28		9,64
NBS 28		9,68
NBS 28		9,89
NBS 28		9,94
NBS 28		9,48
NBS 28		8,92
NBS 28		10,03
NBS 28		9,55
NBS 28		9,45
Cyclotella meneghiniana (Rohwert)		26,08
		26,36
		26,22
		26,28
Cyclotella meneghiniana	7 Tage	26,21
		26,32
		26,16
		25,97
Cyclotella meneghiniana	14 Tage	26,24
		26,45
		26,28
Cyclotella meneghiniana	28 Tage	25,89
		26,07
		26,19
Cyclotella meneghiniana	62 Tage	26,35
		26,49
		26,55

ANHANG

BIOGENER OPAL

Probe	δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
Ethmodiskus rex	46,71
Ethmodiskus rex	46,70
Ethmodiskus rex	46,75
Ethmodiskus rex	46,69
Ethmodiskus rex	47,01
Ethmodiskus rex	46,86
Ethmodiskus rex	46,67
Ethmodiskus rex	46,69
Ethmodiskus rex	46,71
Ethmodiskus rex	46,60
Ethmodiskus rex	46,60
Ethmodiskus rex	46,92
HZM Diatomeen aus Kastengreiferprobe	
Korngrößenfraktion 20 - 80 µm	30,11
	30,09
	30,12
	30,16
	30,10
Korngrößenfraktion 10 - 20 µm	29,89
	30,23
	30,17
	29,88
	30,32
Korngrößenfraktion 5 - 10 µm	29,80
	29,91
	29,57
	29,94

Probe		δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
Test der Vorkonditioniertemperatur		
Laborstandard	0°C	28,69
		27,67
		28,26
		28,41
		27,86
		27,96
		28,21
Laborstandard	500°C	26,18
		26,44
		25,54
		26,39
Laborstandard	800°C	25,77
		25,60
		25,71
		25,83
Laborstandard	980°C	25,50
		25,63
		25,70
		25,63
Laborstandard	1040°C	25,60
		25,63
		25,59
		25,58
Fragialria crotonensis	0°C	90,07
		91,63
		90,09
Fragialria crotonensis	500°C	48,66
		48,54
Fragialria crotonensis	800°C	27,38
		27,02
Fragialria crotonensis	980°C	25,18
		25,50
		25,53
Fragialria crotonensis	1040°C	25,07
		25,48
		25,57
		25,34
		25,05

BIOGENER OPAL

Probe	Korngrößen-klasse [µm]	δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
HZM / 12.09.00 / 7 m	20 - 80	26,98
	10 - 20	27,54
	5 - 10	27,01
		27,10
		27,07
HZM / 10.10.00 / 7 m	20 - 80	28,12
	10 - 20	28,29
		27,91
	5 - 10	27,52
		27,99
HZM / 07.11.00 / 7 m	20 - 80	28,74
	10 - 20	28,71
		28,56
		29,11
	5 - 10	27,94**
		28,60
		28,88
HZM / 13.02.01 / 7 m	20 - 80	29,03
		29,28
	10 - 20	29,46
		29,60
		29,21
	5 - 10	28,87
		29,14
		29,04
HZM / 13.02.01 / 16 m	20 - 80	29,48
	10 - 20	29,31
		29,49
		29,22
		29,29
HZM / 13.03.01 / 7 m	20 - 80	28,66
		28,51
		28,37
	10 - 20	28,36
		28,25
		28,22
		28,21
		28,29
	5 - 10	28,54
		28,41
		28,48
HZM / 13.03.01 / 16 m	20 - 80	28,33*
	10 - 20	28,33*
	5 - 10	28,33*

Probe	Korngrößen-klasse [µm]	δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
HZM / 10.04.01 / 7 m	10 - 20	27,62
		27,73
		27,75
		28,00
	5 - 10	28,02
HZM / 10.04.01 / 16 m	20 - 80	28,02
	10 - 20	28,20
		28,88
		28,51
	5 - 10	28,59
HZM / 08.05.01 / 7 m	20 - 80	27,71
		27,68
		27,80
	10 - 20	27,15
		27,01
		26,87
		26,99
		26,94
		27,09
		27,17
		27,07
	5 - 10	27,19
		27,10
		26,57**
HZM / 08.05.01 / 16 m	20 - 80	28,36
		29,20
	10 - 20	28,87
		29,03
		28,60
		28,69
	5 - 10	28,09
		27,93
		27,80
HZM / 06.06.01 / 7 m	20 - 80	26,21
	10 - 20	25,87**
		26,55
		26,29
	5 - 10	26,39
		26,43
HZM / 06.06.01 / 16 m	20 - 80	28,61
	10 - 20	28,32
		28,48
		28,49
	5 - 10	***

ANHANG

BIOGENER OPAL

Probe	Korngrößen-klasse [µm]	δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
HZM / 03.07.01 / 7 m	20 - 80	27,18
		26,22**
		26,97
	10 - 20	27,58
		27,39
		27,44
		27,24
	5 - 10	27,26
		27,73
		26,11**
		27,52
HZM / 03.07.01 / 16 m	20 - 80	***
	10 - 20	28,46
		28,28
	5 - 10	28,41
HZM / 31.07.01 / 7 m	20 - 80	26,83
	10 - 20	25,71**
		26,55
		26,68
	5 - 10	26,80
		26,77
HZM / 31.07.01 / 16 m	20 - 80	28,04
	10 - 20	***
	5 - 10	***
HZM /28.08.01 / 16 m	20 - 80	27,05
	10 - 20	28,16**
		28,59
		28,60
		28,62
		28,76
	5 - 10	27,14
HZM / 28.08.01 / 7 m	20 - 80	28,65
	10 - 20	26,92
		26,81
		25,95
	5 - 10	27,23
		27,11
		26,95
		27,05
HZM / 25.09.01 / 7 m	20 - 80	26,80
	10 - 20	26,44
		29,22**
		26,84
		27,01

Probe	Korngrößen-klasse [µm]	δ^{18}_{SiO2} (‰) vs. V-SMOW
HZM / 25.09.01 / 7 m	5 - 10	26,62
		26,86
		26,69
HZM / 25.09.01 / 16 m	20 - 80	29,08**
		27,67
	10 - 20	27,03
		27,20
		27,53
	5 - 10	26,33
		26,35
		26,53
HZM / 23.10.01 / 7 m	20 - 80	27,56
	10 - 20	27,47
	5 - 10	28,25
		27,91
		27,72
HZM / 23.10.01 / 16 m	20 - 80	27,14**
		27,76
		27,51
		27,63
		27,47
	10 - 20	27,26
		27,37
	5 - 10	***
HZM / 20.11.01 / 7 m	20 - 80	28,55
	10 - 20	28,74
	5 - 10	***
HZM / 20.11.01 / 16 m	20 - 80	28,65
	10 - 20	28,70
		28,45
	5 - 10	***
HZM / 06.02.02 / 7 m	20 - 80	28,57
	10 - 20	28,59
		28,84
		28,75
	5 - 10	****
HZM / 06.02.02 / 16 m	20 - 80	29,81
	10 - 20	29,49
		29,56
		29,52
		30,14**
		29,69
	5 - 10	***

* aufgrund sehr geringer Mengen separierbarer Diatomeenvalven wurden die 3 Teilproben zur Messgaserzeugung zu einer Mischprobe zusammengeführt

** Ausreißer; Wert geht nicht in den in der Arbeit verwendeten Mittelwert ein

*** aufgrund zu geringer Mengen separierbarer Diatomeenvalven war keine Messgaserzeugung möglich

**** die Diatomeenvalven der Korngrößenfraktion wurde nicht aus dem rezenten Sediment separiert

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment

1. **Energiemodelle in der Bundesrepublik Deutschland. Stand der Entwicklung**
   IKARUS-Workshop vom 24. bis 25. Januar 1996
   herausgegeben von S. Molt, U. Fahl (1997), 292 Seiten
   ISBN: 3-89336-205-3

2. **Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Stromwirtschaft**
   Ein Beitrag zum Klimaschutz
   Workshop am 19. Februar 1997, veranstaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
   herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. Schultze (1997), 138 Seiten
   ISBN: 3-89336-206-1

3. **Modellinstrumente für CO_2-Minderungsstrategien**
   IKARUS-Workshop vom 14. bis 15. April 1997
   herausgegeben von J.-Fr. Hake, P. Markewitz (1997), 284 Seiten
   ISBN: 3-89336-207-X

4. **IKARUS-Datenbank - Ein Informationssystem zur technischen, wirtschaftlichen und umweltrelevanten Bewertung von Energietechniken**
   IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
   Abschlußbericht Teilprojekt 2 „Datenbank“
   H.-J. Laue, K.-H. Weber, J. W. Tepel (1997), 90 Seiten
   ISBN: 3-89336-214-2

5. **Politikszenarien für den Klimaschutz**
   Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
   Band 1. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO_2-Emissionen in Deutschland bis zum Jahre 2005
   herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 410 Seiten
   ISBN: 3-89336-215-0

6. **Politikszenarien für den Klimaschutz**
   Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
   Band 2. Emissionsminderungsmaßnahmen für Treibhausgase, ausgenommen energiebedingtes CO_2
   herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1997), 110 Seiten
   ISBN: 3-89336-216-9

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment

7. **Modelle für die Analyse energiebedingter Klimagasreduktionsstrategien**
   IKARUS. Instrumente für Klimagas-Reduktionsstrategien
   Abschlußbericht Teilprojekt 1 „Modelle“
   P. Markewitz, R. Heckler, Ch. Holzapfel, W. Kuckshinrichs, D. Martinsen, M. Walbeck, J.-Fr. Hake (1998), VI, 276 Seiten
   ISBN: 3-89336-220-7

8. **Politikszenarien für den Klimaschutz**
   Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
   Band 3. Methodik-Leitfaden für die Wirkungsabschätzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung
   herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1998), VIII, 95 Seiten
   ISBN: 3-89336-222-3

9. **Horizonte 2000**
   6. Wolfgang-Ostwald-Kolloquium der Kolloid-Gesellschaft
   3. Nachwuchstage der Kolloid- und Grenzflächenforschung
   Kurzfassungen der Vorträge und Poster
   zusammengestellt von F.-H. Haegel, H. Lewandowski, B. Krahl-Urban (1998), 150 Seiten
   ISBN: 3-89336-223-1

10. **Windenergieanlagen - Nutzung, Akzeptanz und Entsorgung**
    von M. Kleemann, F. van Erp, R. Kehrbaum (1998), 59 Seiten
    ISBN: 3-89336-224-X

11. **Policy Scenarios for Climate Protection**
    Study on Behalf of the Federal Environmental Agency
    Volume 4. Methodological Guideline for Assessing the Impact of Measures for Emission Mitigation
    edited by G. Stein, B. Strobel (1998), 103 pages
    ISBN: 3-89336-232-0

12. **Der Landschaftswasserhaushalt im Flußeinzugsgebiet der Elbe**
    Verfahren, Datengrundlagen und Bilanzgrößen
    Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 1.
    von R. Kunkel, F. Wendland (1998), 110 Seiten
    ISBN: 3-89336-233-9

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment

13. **Das Nitratabbauvermögen im Grundwasser des Elbeeinzugsgebietes**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 2.
von F. Wendland, R. Kunkel (1999), 166 Seiten
ISBN: 3-89336-236-3

14. **Treibhausgasminderung in Deutschland zwischen nationalen Zielen und internationalen Verpflichtungen**
IKARUS-Workshop am 27.05.1998, Wissenschaftszentrum Bonn-Bad Godesberg. Proceedings
herausgegeben von E. Läge, P. Schaumann, U. Fahl (1999), ii, VI, 146 Seiten
ISBN: 3-89336-237-1

15. **Satellitenbildauswertung mit künstlichen Neuronalen Netzen zur Umweltüberwachung**
Vergleichende Bewertung konventioneller und Neuronaler Netzwerkalgorithmen und Entwicklung eines integrierten Verfahrens
von D. Klaus, M. J. Canty, A. Poth, M. Voß, I. Niemeyer und G. Stein (1999), VI, 160 Seiten
ISBN: 3-89336-242-8

16. **Volatile Organic Compounds in the Troposphere**
Proceedings of the Workshop on Volatile Organic Compounds in the Troposphere held in Jülich (Germany) from 27 – 31 October 1997
edited by R. Koppmann, D. H. Ehhalt (1999), 208 pages
ISBN: 3-89336-243-6

17. **CO_2-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das CO_2-Minderungsprogramm der KfW**
Eine modellgestützte Wirkungsanalyse
von M. Kleemann, W. Kuckshinrichs, R. Heckler (1999), 29 Seiten
ISBN: 3-89336-244-4

18. **Symposium über die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen Sonne und Wind auf Fischereischiffen und in Aquakulturbetrieben**
Symposium und Podiumsdiskussion, Izmir, Türkiye, 28.-30.05.1998. Konferenzbericht
herausgegeben von A. Özdamar, H.-G. Groehn, K. Ülgen (1999), IX, 245 Seiten
ISBN: 3-89336-247-9

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment

19. **Das Weg-, Zeitverhalten des grundwasserbürtigen Abflusses im Elbeeinzugsgebiet**
Analyse von Wasserhaushalt, Verweilzeiten und Grundwassermilieu im Flußeinzugsgebiet der Elbe (Deutscher Teil). Abschlußbericht Teil 3.
von R. Kunkel, F. Wendland (1999), 122 Seiten
ISBN: 3-89336-249-5

20. **Politikszenarien für den Klimaschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Band 5. Szenarien und Maßnahmen zur Minderung von CO_2-Emissionen in Deutschland bis 2020
herausgegeben von G. Stein, B. Strobel (1999), XII, 201 Seiten
ISBN: 3-89336-251-7

21. **Klimaschutz durch energetische Sanierung von Gebäuden. Band 1**
von J.-F. Hake, M. Kleemann, G. Kolb (1999), 216 Seiten
ISBN: 3-89336-252-2

22. **Electroanalysis**
Abstracts of the 8th International Conference held from 11 to 15 June 2000 at the University of Bonn, Germany
edited by H. Emons, P. Ostapczuk (2000), ca. 300 pages
ISBN: 3-89336-261-4

23. **Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050**
von M. Kleemann, R. Heckler, G. Kolb, M. Hille (2000), II, 94 Seiten
ISBN: 3-89336-262-2

24. **Grundlegende Entwicklungstendenzen im weltweiten Stoffstrom des Primäraluminiums**
von H.-G. Schwarz (2000), XIV, 127 Seiten
ISBN: 3-89336-264-9

25. **Klimawirkungsforschung auf dem Prüfstand**
Beiträge zur Formulierung eines Förderprogramms des BMBF
Tagungsband des Workshop „Klimaforschung“, Jülich, vom 02. bis 03.12.1999
von J.-Fr. Hake, W. Fischer (2000), 150 Seiten
ISBN: 3-89336-270-3

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment

26. **Energiezukunft 2030**
Schlüsseltechnologien und Techniklinien
Beiträge zum IKARUS-Workshop 2000 am 2./3. Mai 2000
herausgegeben von U. Wagner, G. Stein (2000), 201 Seiten
ISBN: 3-89336-271-1

27. **Der globale Wasserkreislauf und seine Beeinflussung durch den Menschen**
Möglichkeiten zur Fernerkundungs-Detektion und -Verifikation
von D. Klaus und G. Stein (2000), 183 Seiten
ISBN: 3-89336-274-6

28. **Satelliten und nukleare Kontrolle**
Änderungsdetektion und objektorientierte, wissensbasierte Klassifikation von Multispektralaufnahmen zur Unterstützung der nuklearen Verifikation
von I. Niemeyer (2001), XIV, 206 Seiten
ISBN: 3-89336-281-9

29. **Das hydrologische Modellsystem J2000**
Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten
von P. Krause (2001), XIV, 247 Seiten
ISBN: 3-89336-283-5

30. **Aufwands- und ergebnisrelevante Probleme der Sachbilanzierung**
von G. Fleischer, J.-Fr. Hake (2002), IV, 64 Blatt
ISBN: 3-89336-293-2

31. **Nachhaltiges Management metallischer Stoffströme**
Indikatoren und deren Anwendung
Workshop, 27.-28.06.2001 im Congresscentrum Rolduc, Kerkrade (NL)
herausgegeben von W. Kuckshinrichs, K.-L. Hüttner (2001), 216 Seiten
ISBN: 3-89336-296-7

32. **Ansätze zur Kopplung von Energie- und Wirtschaftsmodellen zur Bewertung zukünftiger Strategien**
IKARUS-Workshop am 28. Februar 2002, BMWi, Bonn. Proceedings
herausgegeben von S. Briem, U. Fahl (2003), IV, 184 Seiten
ISBN: 3-89336-321-1

33. **TRACE. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology**
Volume 1: Proceedings of the Dendrosymposium 2002,
April 11th – 13th 2002, Bonn/Jülich, Germany
edited by G. Schleser, M. Winiger, A. Bräuning et al., (2003), 135 pages, many partly coloured illustrations
ISBN: 3-89336-323-8

34. **Klimaschutz und Beschäftigung durch das KfW-Programm zur CO_2-Minderung und das KfW-CO_2-Gebäudesanierungsprogramm**
von M. Kleemann, R. Heckler, A. Kraft u. a., (2003), 53 Seiten
ISBN: 3-89336-326-2

35. **Klimaschutz und Klimapolitik: Herausforderungen und Chancen**
Beiträge aus der Forschung
herausgegeben von J.-Fr. Hake, K. L. Hüttner (2003), III, 231 Seiten
ISBN: 3-89336-327-0

36. **Umweltschutz und Arbeitsplätze, angestoßen durch die Tätigkeiten des Schornsteinfegerhandwerks**
Auswertung von Schornsteinfeger-Daten
von M. Kleemann, R. Heckler, B. Krüger (2003), VII, 66 Seiten
ISBN: 3-89336-328-9

37. **Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen**
von H. Bogena, R. Kunkel, T. Schöbel, H. P. Schrey, F. Wendland (2003), 148 Seiten
ISBN: 3-89336-329-7

38. **Dendro-Isotope und Jahrringbreiten als Klimaproxis der letzten 1200 Jahre im Karakorumgebirge/Pakistan**
von K. S. Treydte (2003), XII, 167 Seiten
ISBN: 3-89336-330-0

39. **Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland**
herausgegeben von P. Markewitz, G. Stein (2003), IV, 274 Seiten
ISBN: 3-89336-333-5

40. **Umweltverhalten von MTBE nach Grundwasserkontamination**
von V. Linnemann (2003), XIV, 179 Seiten
ISBN: 3-89336-339-4

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment

41. **Climate Change Mitigation and Adaptation: Identifying Options for Developing Countries**
Proceedings of the Summer School on Climate Change, 7-17 September 2003, Bad Münstereifel, Germany
edited by K. L. Hüttner, J.-Fr. Hake, W. Fischer (2003), XVI, 341 pages
ISBN: 3-89336-341-6

42. **Mobilfunk und Gesundheit: Risikobewertung im wissenschaftlichen Dialog**
von P. M. Wiedemann, H. Schütz, A. T. Thalmann (2003), 111 Seiten
ISBN: 3-89336-343-2

43. **Chemical Ozone Loss in the Arctic Polar Stratosphere: An Analysis of Twelve Years of Satellite Observations**
by S. Tilmes (2004), V, 162 pages
ISBN: 3-89336-347-5

44. **TRACE. Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology**
Volume 2: Proceedings of the Dendrosymposium 2003,
May 1st – 3rd 2003, Utrecht, The Netherlands
edited by E. Jansma, A. Bräuning, H. Gärtner, G. Schleser (2004), 174 pages
ISBN: 3-89336-349-1

45. **Vergleichende Risikobewertung: Konzepte, Probleme und Anwendungsmöglichkeiten**
von H. Schütz, P. M. Wiedemann, W. Hennings et al. (2004), 231 Seiten
ISBN: 3-89336-350-5

46. **Grundlagen für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Grundwasserressourcen in der Metropolregion Hamburg**
von B. Tetzlaff, R. Kunkel, R. Taugs, F. Wendland (2004), 87 Seiten
ISBN: 3-89336-352-1

47. **Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland**
von R. Kunkel, H.-J. Voigt, F. Wendland, S. Hannappel (2004), 207 Seiten
ISBN: 3-89336-353-X

48. **Water and Sustainable Development**
edited by H. Bogena, J.-Fr. Hake, H. Vereecken (2004), 199 pages
ISBN: 3-89336-357-2

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Umwelt / Environment

49. **Geo- and Biodynamic Evolution during Late Silurian / Early Devonian Time (Hazro Area, SE Turkey)**
by O. Kranendonck (2004), XV, 268 pages
ISBN: 3-89336-359-9

50. **Politikszenarien für den Umweltschutz**
Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes
Langfristszenarien und Handlungsempfehlungen ab 2012 (Politikszenarien III)
herausgegeben von P. Markewitz u. H.-J. Ziesing (2004), XVIII, 502 Seiten
ISBN: 3-89336-370-X

51. **Die Sauerstoffisotopenverhältnisse des biogenen Opals lakustriner Sedimente als mögliches Paläothermometer**
von R. Moschen (2004), XV, 130 Seiten
ISBN: 3-89336-371-8

Um einen möglichen Einsatz der $^{18}O/^{16}O$-Verhältnisse subfossiler und fossiler Kieselalgenskelette als Paläothermometer zu evaluieren, wurde im Rahmen einer Langzeitstudie die Isotopenfraktionierung biogenen Opals in Abhängigkeit von der Wassertemperatur beim Wachstum rezenter Kieselalgen untersucht. Dabei konnte erstmalig in einem natürlichen lakustrinen Habitat (Holzmaar/Westeifel) eine systematische Beziehung zwischen der Wassertemperatur und der Fraktionierung nachgewiesen werden. Im Temperaturbereich von 3 bis 22 °C liegt eine lineare Beziehung mit einem Temperaturkoeffizienten von -0,2 ‰/°C vor.

Autor:

Robert Moschen studierte Physische Geographie an der Universität zu Köln. Während seines Studiums befasste er sich intensiv mit vegetationsgeographischen, ökologischen und umweltanalytischen Fragestellungen. Am Forschungszentrum Jülich begann er im Jahr 2000 mit Untersuchungen zur Sauerstoffisotopenfraktionierung beim Aufbau von biogenem Opal durch Kieselalgen. Der Inhalt dieses Buches wurde von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität zu Köln als Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades angenommen.

Institut:

Der Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten des **Institutes für Chemie und Dynamik der Geosphäre V: Sedimentäre Systeme** besteht in der Erforschung der Dynamik ökologischer und klimatischer Prozesse im Hinblick auf die Konsequenzen anthropogener Aktivitäten. Entscheidend sind Untersuchungen zum Mechanismus der Übertragung klimatischer Größen in Stellvertreterdaten, sog. Klimaproxies, wie sie aus Klimaarchiven extrahierbar sind. Die Rekonstruktion natürlicher Klimaänderungen während des Holozäns mit Hilfe der stabilen Isotope von Kohlenstoff und Sauerstoff aus terrestrischen Klimaarchiven vervollständigen die Aktivitäten.

Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Band/Volume 51
ISBN 3-89336-371-8

Umwelt
Environment